

주물의 디버링(Deburring) 로봇트에 관한 연구

(PID-유량제어에 의한 그라인더의 목표궤도제어)

姜 順童, 許 萬祚, 原 敬, 橫川 隆一

Robotic Deburring for Casting

(Trajectory Control of Grinder by PID Flow Rate Control)

Soondong KANG, Doshisha University, Manjo HUH, Incheon Junior College
Kei HARA, Doshisha University, Ryuichi YOKOGAWA, Doshisha University

This paper presents modifications of a hydraulic shovel to robotize, and we derive a dynamic model of the hydraulic shovel arms, and hydraulic analysis are discussed. Then, our purpose is making to imitate a target railroad line of the grinder position by the PID control. Moreover, to determine the gains of the PID controller, we referenced the Ziegler and Nichols method. In this paper, we demonstrated that the PID control is available for system. These results indicated the possibility of practical use of the deburring robot with the hydraulic shovel.

Key Words : Deburring, Hydraulic Shovel, PID Control, Grinder, Industrial Robots, Flow Rate Characteristics

1. 서론

주조후의 최종공정인 디버링 작업은 나쁜 작업조건하에서 작업자가 무거운 그라인더를 들고 작업하고 있다. 따라서 작업자의 부담을 가능한 줄이고 더불어 안정성을 확보하기 위해서는 로봇트를 이용한 디버링 작업의 자동화가 요구되어지고 있다. 현재 디버링 로봇트의 연구¹⁾, 제품화가 빠른 속도로 진행되고 있지만 주물의 이동 시스템이 필요로 하고 로봇트는 고정형이 대부분이다.

또한 고가이기때문에 중소기업이 많은 주물공장에서의 도입은 곤란한 실정이다. 한편 토목건설기계에서 자동제어의 응용은 수년간 급속한 속도로 발전하여 왔다. 그중에서도 유압쇼벨에 의한 굴삭작업, 지면의 마무리²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ 등의 자동화가 추진되고 있는 상황이다. 이러한 배경으로 유압쇼벨을 이용한 작업은 건설작업뿐만이 아닌 다양성을 갖는 작업로봇트로서의 가능성도 보여진다. 따라서 본 연구에서는 건설기계인 유압쇼벨의 로봇트화를 검토하고 여기에 필요한 개조작 수행 하였다. 주물의 디버링 작업은 그 작업의 특성으로부터 큰 출력의 액츄에이터를 갖는 암을 필요로하며 유압 실린더는 여기에 필요한 조건을 갖추고 있다. 유압계는 비선형요소의 집합체이며 모델화가 곤란하기 때문에 선형성에 기초를 둔 고도의 제어이론에는 반드시 유효하다고는 할수없다. 현재 실제의 현장에서는 PID 제어가 약 90%를 점유하고 있으며 유압계에서는 PID 제어가 대부분을 차지하고 있다. 본 연구에서도 PID 제어방법을 이용하고 주물상면에 수직으로 돌출한 직선상의 버(burr)의 연삭을 목적으로하고 로봇트암의 선단을 직선궤도에 추종할수 있도록 시뮬레이션과 실험을 수행하고 본 제어방식의 유효성을 나타냄과 동시에 유압쇼벨을 이용한 디버링 로봇트의 가능성에 대하여 검토를 수행하였다.

2. 디버링 작업과 유압 쇼벨의 로봇트화

본 연구에서의 주물의 디버링 작업은 주조시에 발생하는 버(burr)를 햄머, 그라인더 등의 공구를 사용하여

허용치수범위까지 제거하는것을 전제로하고 유압쇼벨의 각각의 암은 유압 실린더에 의해 동작되고 유압 실린더의 동작은 수동밸브에 장착된 레버에 의해 조작된다. 이 유압 실린더의 동작을 유량제어밸브를 사용하여 제어함으로써 유압 쇼벨을 유압구동형 로봇 암으로서 사용 가능하게 된다. 또한 유압 쇼벨의 바켓(bucket)의 대응으로 구라인더를 장착 하여 디버링 로봇으로서의 기능을 부가 하였다. 본 연구에서는 유압 쇼벨 (コマツ製, PC01) 를 사용하고 여기에 필요한 운동학 해석, 유압특성 해석과 동시에 로봇회로의 검토, 개조를 수행하였다. 개조후의 외관을 Fig.1에 나타낸다.

3. 실험장치

본 시스템은 Fig.2에 나타낸 바와 같이 유압 쇼벨, 센서부, 액츄에이터부, 콘트롤러부로 구성되었다. 콘트롤러부(Personal Computer, NEC製, PC9801BP) 는 센서신호로부터 연산한 조작량을 D/A변환하고 서어보 밸브에 제어전압을 출력함으로써 실린더가 구동되고 암의 회전운동으로 변환 되어진다. 그리고 암의 회전각도는 엔코더에 의해 검출되어 인터페이스 보드 (PIO Board, PIO-96W(98K)) 를 통하여 계산되어진다. 또한, 관로중의 압력은 압력센서에 의해 검출되어 A/D변환 되어진다.

4. 유압특성

본 연구에서는 로봇의 액츄에이터로서 유압 실린더를 사용하고 있다. 유압특성은 비선형성이 대단히 강하지만 시스템의 제어, 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 유압특성을 고려해야만 한다. 유압계를 모델화 하기 위해서 이하의 항목을 가정한다.

- 1) 유압 회로내의 오일손실은 무시한다.
- 2) 작동유의 성질은 온도, 압력등에 관계없이 일정한 것으로 한다.
- 3) 작동유가 관로내를 흐를 때에 압력강하는 발생하지 않는다.
- 4) 펌프의 공급압력은 일정하다.

본 연구에 사용하는 전지비례방향 유량제어밸브의 구조는 비례솔레노이드가 전류에 비례한 힘으로 스푼(Spool) 를 밀고 대항하는 스프링으로 원하는 위치에서 정지시키고 스푼의 개폐를 제어한다. 이하에서는 유압 서어보 밸브의 동특성과 일반적특성에 대하여 논한다.

4. 1 동특성

스풀 밸브의 속도를 V_v , 변위를 X_v 로하면 스푼의 운동방정식은 일반적으로 다음과 같다.

$$\frac{dV_v}{dt} = -\omega_v^2 X_v - 2\zeta_v V_v + K_v \omega_v^2 i$$

여기서 ω_v , ζ_v , K_v 는 각각 고유진동수, 감쇠비, 속도이득이며 i 는 유량지령치이다.

4. 2 유량제어밸브와 유압실린더의 특성

작동유가 유량제어밸브를 통과 할때의 차압 ΔP 와 유량 Q 은 다음의 식으로 나타낸다.

$$Q = cX_v \sqrt{\Delta P}$$

또한 실린더실에 출입하는 유량 및 피스톤 축의 동작에 의한 실린더실 내부의 압력상승률은 다음의 식으로 나타낸다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{K}{V_1} (Q_1 - A_1 \dot{Y}) \quad \frac{dP_2}{dt} = \frac{K}{V_2} (Q_2 - A_2 \dot{Y})$$

여기서 P_1, P_2 , 은 유입쪽 및 유출쪽의 압력, V_1, V_2 , 는 실린더실의 용적, A_1, A_2 , 는 실린더실의 면적이다. 또한, K 는 체적탄성률, Y 는 피스톤축의 속도이다.

4. 3 본 시스템의 유량특성

본 시스템은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 실린더1은 제1압을 지지하고 있기때문에 실린더 헤드쪽이 항상 고압이 된다. 한편 실린더2, 3은 제2압, 제3압의 중력때문에 실린더 로드쪽이 항상 고압이 된다. 유압 제어를 수행할 경우에는 고압쪽을 제어하는것이 기본이기 때문에 각 실린더의 고압쪽에 대해서는 메터인(실린더에 들어가는 유량을 제어), 메터아웃(실린더에서 나가는 유량을 제어)의 제어가 필요하다. 또한 그라인더를 수평직선운동할 경우 각 실린더의 동작방향이 틀리기 때문에 메터인, 메터아웃으로 분리해서 제어할 필요가 있다. 유압쇼벨에 장착되어 있는 유압 실린더는 비대칭 즉 실린더 양쪽의 수압면적이 틀린 구조로 되어있지만 비대칭 실린더에 의한 동특성의 비선형성은 무시한다. 본 연구에 이용한 유량제어밸브의 유량특성은 다음의 식과 같이 구하였다.

1) 제1압의 경우

$$Q_{11} = c_1 v_1 \sqrt{(P_s - P_{11})} \quad (\text{Push})$$

$$Q_{12} = c_1 v_1 \sqrt{P_{11}} \quad (\text{Pull})$$

2) 제2, 3압의 경우

$$Q_{i1} = c_i v_i \sqrt{(P_s - P_{i2})} \quad (\text{Push})$$

$$Q_{i2} = c_i v_i \sqrt{P_{i2}} \quad (\text{Pull})$$

단 Q_{11} Q_{22} Q_{32} 은 실린더1, 2, 3의 고압쪽의 실린더실에 들어가는 유량이다. 여기서 위의 식을 연속의 식으로 나타내면 다음과 같다.

1) 제1압의 경우

$$Q_{1i} = A_i \frac{dY_1}{dt} + \frac{V_{1i} dP_{1i}}{K} \quad (i=1,2)$$

2) 제2, 3압의 경우

$$Q_{ij} = A_j \frac{dY_j}{dt} + \frac{V_{ij} dP_{ij}}{K} \quad (i=2,3 \quad j=1,2)$$

본 연구에 이용한 파라미터는 Table1에 나타낸다.

5. 제어수법

5. 1 제어측

현재 실제의 현장에서 사용 되어지고있는 제어방식은 PID형이 대부분을 차지하고 있다. 또한 유압계에서는 PID제어가 기본으로 되어있으며 본 연구에서도 실용적인 PID제어방식을 이용하는 것으로 하였다.

각 압의 목표각도 θ_{di} 와 현재의 각도 θ_i 와의 편차를 e_i 로 하면

$$e_i = \theta_{di} - \theta_i$$

이것을 미분하면

$$\dot{e}_i = \dot{\theta}_{di} - \dot{\theta}_i$$

로 되고 비례이득을 K_P , 적분이득을 K_I , 미분이득을 K_D 로 하여 유량제어를 다음과 같이 결정한다.

$$Q_i = K_P e_i + K_I \int e_i dt + K_D \dot{e}_i$$

PID제어의 구성도를 Fig 4에 나타낸다.

5. 2 궤도설정

디버팅 작업은 그라인더를 전후로 움직이면서 수행한다. 여기서 본 연구에서는 직선상의 디버팅 작업을 목표로하고 이동속도를 일정하게 하는 궤도를 부여 하였다. 또한 유압계의 충격을 줄이기 위해 출발점과 종단점에 가속과 감속기간을 설정 하였다. 이러한 궤도로부터 역운동학, 야코비 행렬을 이용하여 각 관절의 목표각도, 목표가속도로 변환하였다.

5. 4 실험조건

디버팅 작업의 조건으로서 그라인더의 접촉각도, 절삭량 및 연삭속도 등이 있다. 다음은 주물의 디버팅 작업조건을 나타낸다.

- 1) 가속시간 : 5(sec)
- 2) 감속시간 ; 5(sec)
- 3) 등속시간 : 50(sec)
- 4) 초기위치 : 900 (mm) 또는 1300 (mm)
- 5) 종단위치 : 1300 (mm) 또는 900 (mm)
- 6) 연삭높이 : 지면으로부터 500 (mm)
- 7) 그라인더 각도 : 15 (deg)
- 8) 샘플링 시간 : 2 (msec)

6. 실험

6. 1 시뮬레이션 실험

본 연구에서의 시뮬레이션에서는 운동특성, 유압특성을 고려하여 수행하였으며 블록선도를 Fig.5에 나타낸다. 본 연구에 사용한 이득을 Table2에 나타낸다.

6. 2 실기실험

실기의 실험에서는 수동조작에 의해 아웃리거(Outrigger)와 블레이드(Blade)로 본체를 지면에 고정하고 유압회로를 수동밸브에서 서어보 밸브로 전환한후 Ziegler and Nichols의 이득 조정법을 참고로하여 다음과 같이 수행하였다.

1) 예비실험

PID제어를 수행하기 위한 예비실험으로서 한계감도법을 이용하여 지속진동을 일으키는 비례이득을 구할 필요가 있지만 실기의 동작이 큰 진폭으로 움직이면 위험하기 때문에 비례제어보다 정치제어실험을 수행하고 이득을 점점 높게 설정하였으며 안전하게 수속한 이득은 Table3과 같다. 이때의 이득을 K_c 로 한다. 이 이득을 이용하여 궤도제어를 수행한 결과를 Fig.6에 나타낸다.

2) PD 제어

PD 제어의 결과를 Fig.7에 나타낸다.

3) PID 제어

PID 제어의 결과를 Fig.8에 나타낸다.

7. 결과와 고찰

7. 1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 결과 (Fig.5 · 1) 보면 그라인더 선단의 수평방향의 위치오차는 $\pm 3\text{mm}$ 이내의 양호한 결과가 얻어졌다. 가속 및 감속시에 목표치의 변화가 크기때문에 목표궤도에서의 오차도 크지만 등속이동 시에는 부드러운 움직임을 보임과 동시에 진동이 크게 줄어들었고 목표궤도 추종성능은 좋은 결과가 얻어졌다고 판단 되어진다. 또한 Ziegler and Nichols의 이득조정법²⁾을 이용하여 양호한 결과를 얻게 되었고 실기에 의한 실험에도 이 방법을 적용하는 것으로 하였다.

7. 2 실기에 의한 실험결과

1) 예비실험 (P제어)

Fig.6으로부터 그라인더 선단의 위치는 $\pm 5\text{mm}$ 정도로 진동을 발생하면서 쇼벨의 본체로부터 떨어질수록 목표위치에서 내려가는 경향이 보여진다. 각 압의 자세가 수평에 가까운 상태에서는 수평방향의 위치오차, 수직에 가까운 상태에서는 수직방향의 위치오차가 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 그라인더가 쇼벨의 본체로부터 떨어질수록 수평방향의 제어가 어려운 것을 알수 있었다. 또한 이러한 원인으로서의 중력부하가 증가 하는데 있다고 판단 되어진다. P제어는 이득을 높게 설정하는것이 그라인더의 위치오차, 각도오차가 작게 되는것을 알수 있었다. 각도오차는 상당히 진동이 발생하였고 영을 기준으로 하지않고 목표위치로부터 오차가 발생 하였다. 또한 압력변화는 압의 자세로부터 중력부하가 변화하기때문에 압이 회전함에따라서 증가 또는 감소하였다.

2) PD 제어

각도오차는 미분항을 부가함으로써 진동적인 변화에 제동력이 생겨 예비실험과 비교했을때 상당히 좋은 결과가 얻어졌다. 그러나 제2압의 각도오차에는 급격한 오차가 보여졌다. 또한 이때의 압력변화에도 급격한 변화가 일어남을 알수 있었다.

3) PID 제어

적분항 및 미분항의 효과에 의해 PID 제어에서는 그라인더 선단의 위치오차 및 각도오차는 크게 줄었다. 그라인더 선단의 위치는 약간은 진동적이지만 부분적으로 $\pm 5\text{mm}$ 이내까지 줄일수 있었다. 그러나 그라인더가 쇼벨의 본체로부터 멀리 있을수록 목표궤도에서 떨어지는 경향은 여전히 나타났으며 앞으로는 압의 자세변화를 고려한 궤도를 부여할 필요가 있다고 사료 되어진다.

4) 유압계의 검토

실험결과, 양호한 결과를 얻은 것으로부터 메터인, 메터아웃 제어의 실행은 적절하였다고 판단 되어진다. 이번엔 변경한 유압회로는 압의 동작을 자동 및 수동조작의 양쪽을 가능하게 하였지만 유압 실린더의 동작을 보면 특히 제1압과 제2압의 동작이 서로 간섭하고 있는것을 알수 있었다. 이것은 실린더의 유압공급원

을 공통으로 사용하고 있기 때문이라고 판단되고 공급압력의 미소변동이 실린더의 구동압력에 영향을 주고 있기 때문이라고 사료 되어진다. 이 문제를 해결하기 위해서는 유압펌프를 각각의 실린더 전용으로 설치하는 것이 좋다고 판단되지만 쇼벨의 본체 이외의 장치를 늘리는 것은 본 로봇트에 있어서의 특징을 무시하는 것으로 유압공급원에 아쿠뎀레이터를 삽입 하는것이 타당 하다고 사료 된다.

8. 결론

본 연구에서는 건설기계인 유압 쇼벨을 3축 유압구동형 로봇트 암으로서 사용하기 위한 개조 및 운동학 특성, 유압특성의 해석을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험으로부터 디버링 로봇트로서의 사용가능성에 대한 검토를 한 결과 다음과 같은 결과를 얻을수 있었다.

- 1) 현재, 현장에서 많이 이용되어지고 있는 PID 제어가 본 연구의 유압구동형 로봇트 암의 궤도제어에 유효함을 알수 있었다.
- 2) 그라인더 선단의 위치오차가 부분적으로는 있지만 전체적으로 $\pm 5\text{mm}$ 이내로 실제의 버(Burr)를 연삭 할수있는 범위까지 제어가 가능하게 되어 유압 쇼벨을 이용한 디버링 로봇트의 실용화에 대한 가능성을 보여 주었다.
- 3) Ziegler and Nichols 의 이득 조정법이 본 시스템에도 유효함이 확인 되었다.

참고문헌

- 1) 山口; 바리取り로봇트시스템における加工送り速度制御, 日本ロボット学会誌, 9巻3号 (1991)
- 2) 森田; 坂和; 파워ショベル의 모델링과 제어, 計測自動制御学会, Vol.22, No. 1, pp69-75, (1986)
- 3) 永所; 油圧ショベル의 操作性의 시뮬레이션에 관한 연구, 日本機械学会論文集 (c編) 58巻554号
- 4) 竹田; 土木建設機械における自動制御, 計測と制御, Vol.21, No. 8, pp800-806, (1982)
- 5) 吉村; 油圧エキスカ베이터의 新操作方式의 연구 (第1報, 新操作方式의 構成と基礎実験), 日本機械学会論文集 (c編), 52巻483号, (1986)
- 6) 日野, 坂井; 트랙크레인의 動特性의 모델化と 제어에 관한 연구 (油圧系를 考慮した起伏運動의 動特性의 모델化), 日本機械学会論文集 (c編) 60巻572号 (1994)
- 7) 須田; PID 制御, 朝倉書店, (1992)

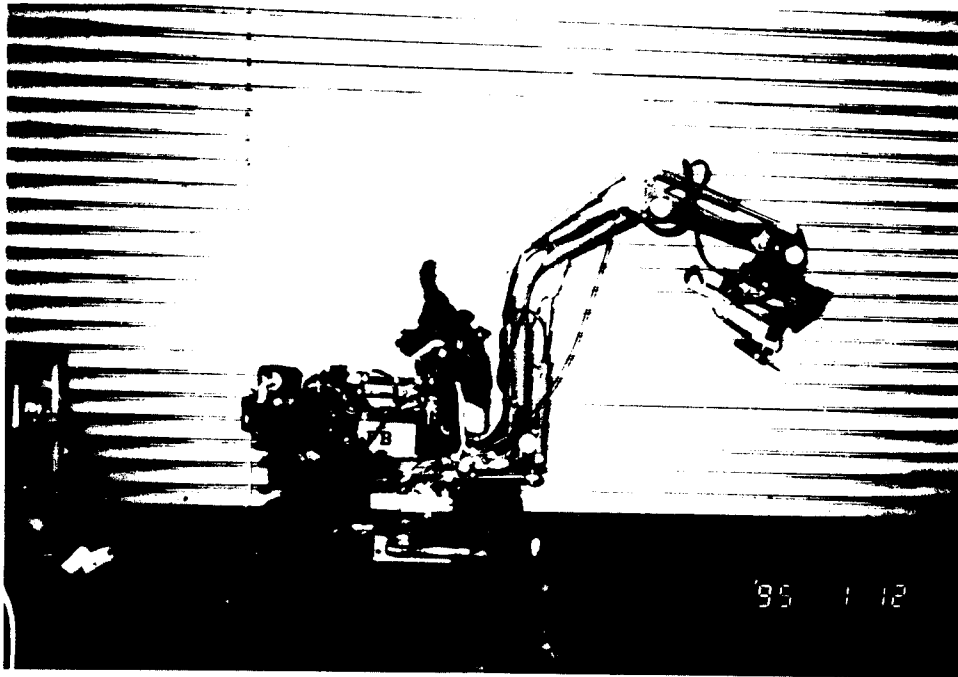


Fig.1 Hydraulic Shovel

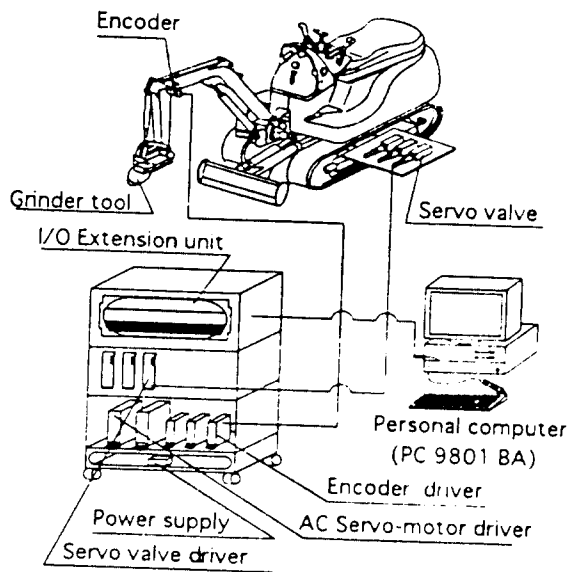


Fig.2 Experimental setup for the deburring system

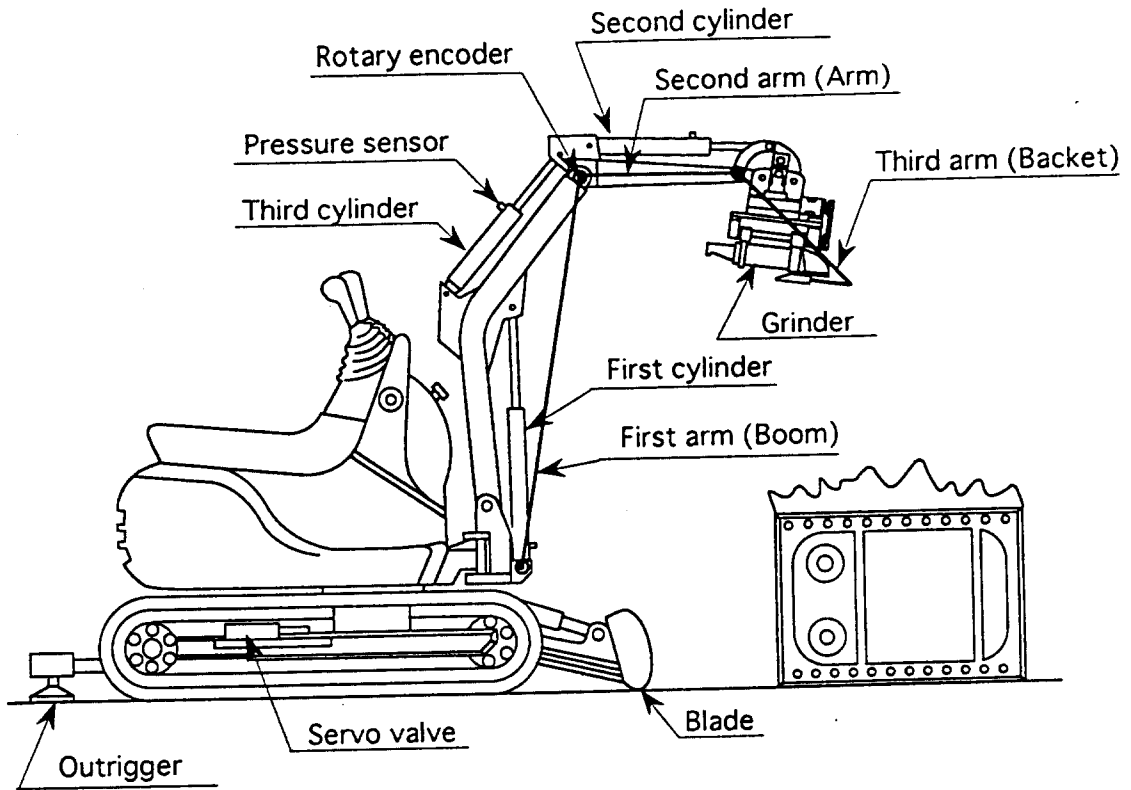


Fig.3 Reconstructed hydraulic shovel

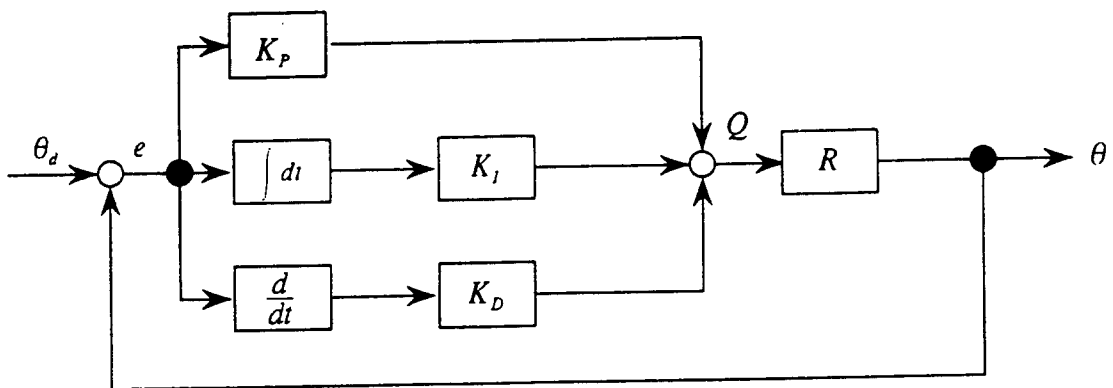
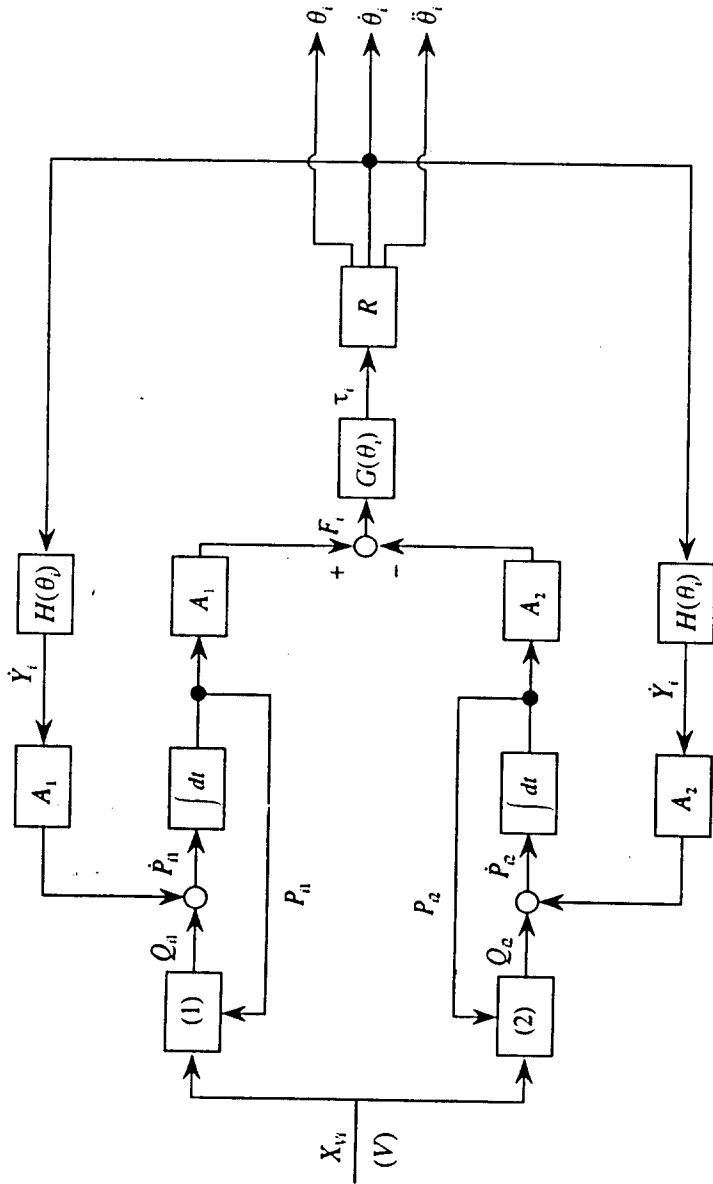


Fig. 4 Block diagram of PID control.



Equation

(1) $Q_{n1} = C_d X_{iv} \sqrt{P_s - P_{n1}} \quad (X_{iv} \geq 0), Q_{n1} = C_d X_{iv} \sqrt{P_{n1}} \quad (X_{iv} < 0)$

(2) $Q_{n2} = C_d X_{iv} \sqrt{P_2} \quad (X_{iv} \geq 0), Q_{n2} = C_d X_{iv} \sqrt{P_s - P_2} \quad (X_{iv} < 0) \quad (i = 1, 2, 3)$

Fig. 5 Block diagram of hydraulic system.

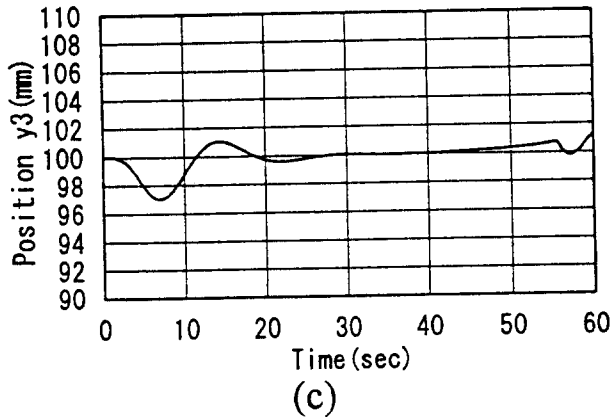
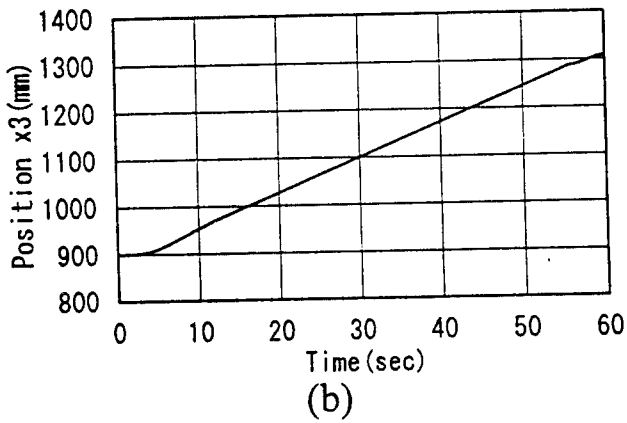
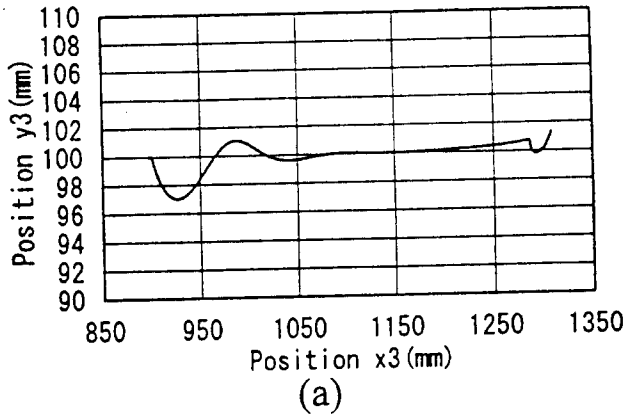


Fig. 5 · 1 Simulation results of PID control(Forward).
 (a) Position x_3 -Position y_3
 (b) Time-Position x_3
 (c) Time-Position y_3

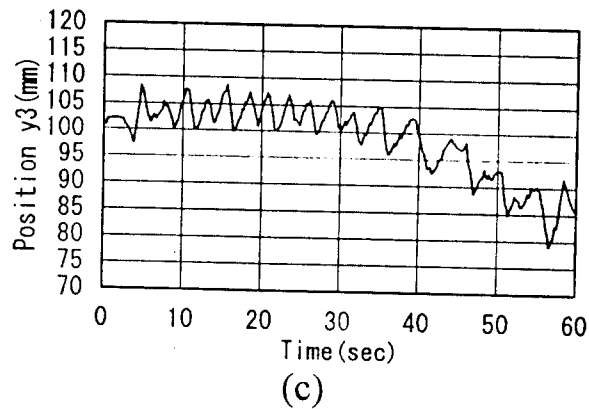
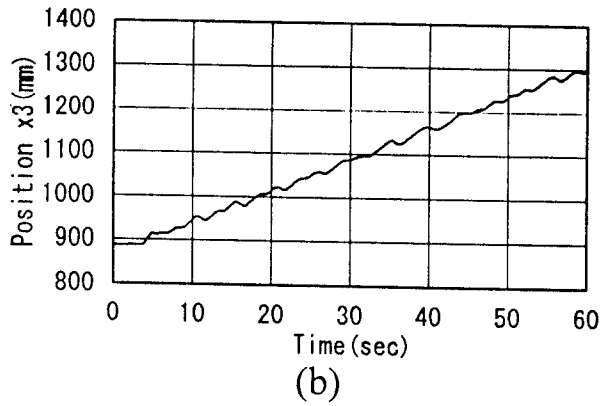
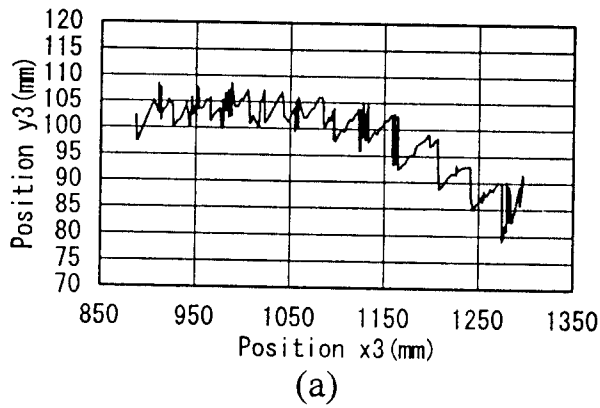


Fig. 6 Experimental results of Prep. P control(Forward).
 (a) Position x_3 -Position y_3
 (b) Time-Position x_3
 (c) Time-Position y_3

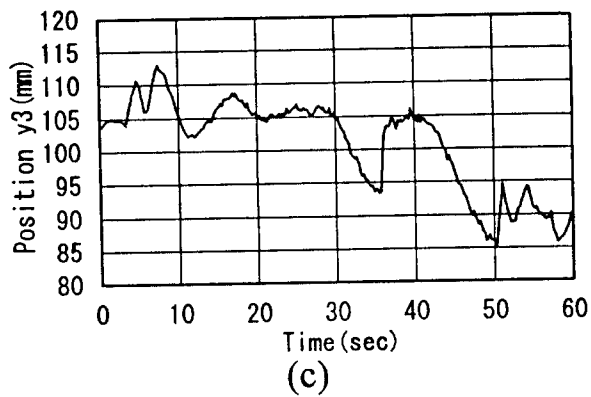
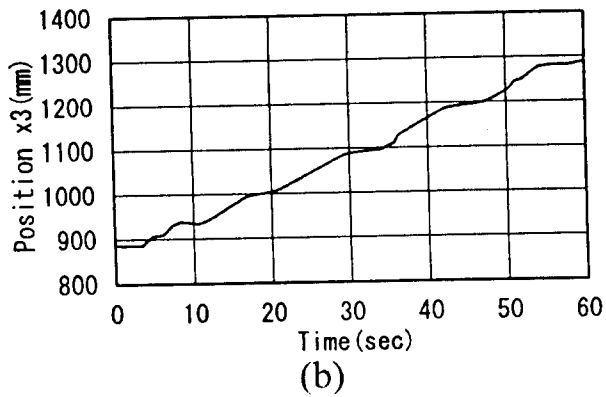
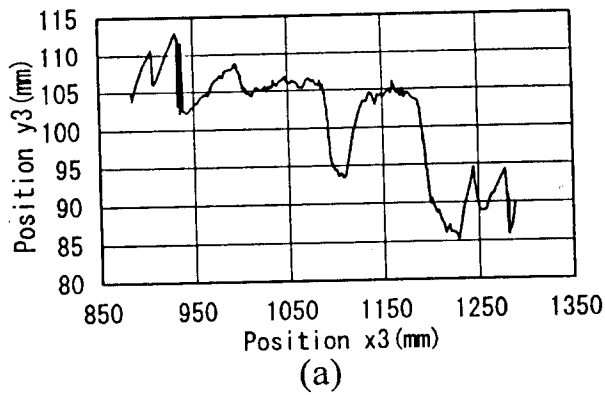
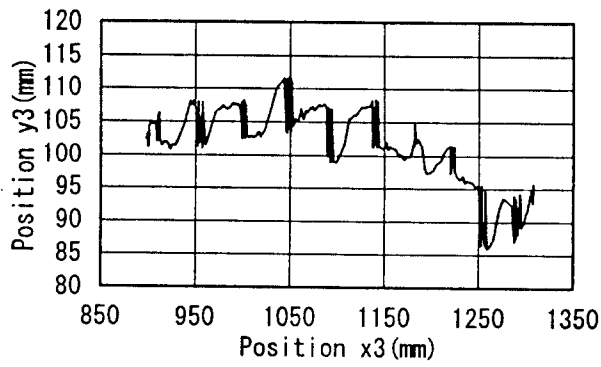


Fig. 7 Experimental results of PD control(Forward).

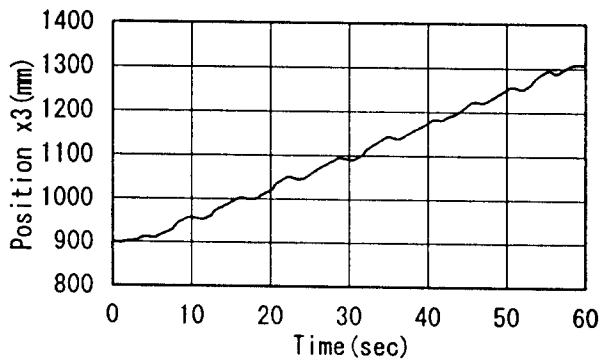
(a) Position x_3 -Position y_3

(b) Time-Position x_3

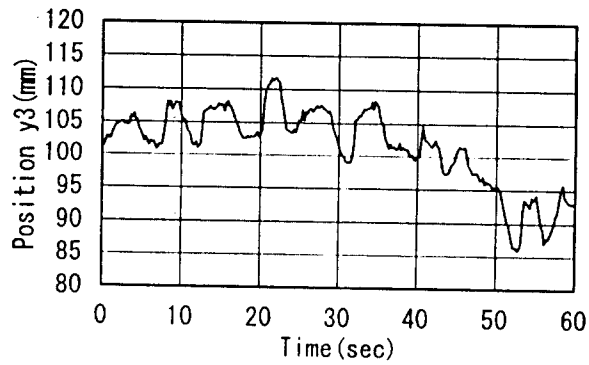
(c) Time-Position y_3



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Experimental results of PID control(Forward).

(a) Position x_3 -Position y_3

(b) Time-Position x_3

(c) Time-Position y_3

Table 1 Parameter of hydraulic system

	Symbol	Value	Unit
Cylinder area of rod side	A_1	9.621	cm ²
Cylinder area of head side	A_2	6.479	cm ²
Supply pressure	p_s	80	kgf/cm ²
Tank port pressure	p_t	0	kgf/cm ²
Bulk modulus of oil	K	6.0×10^6	N/cm ²
Flow coefficient	c_1	0.774	
Flow coefficient	c_2	0.774	
Flow coefficient	c_3	0.774	

Table 2 Gain of PID control

	Proportional gain K_p	Integral gain K_i	Differential gain K_d
Angle θ_1	0.6	0.3	0.06
Angle θ_2	0.6	0.3	0.06
Angle θ_3	0.6	0.3	0.06

Table 3 Gain of Preparation P control

	Proportional gain K_c
Angle θ_1	4000
Angle θ_2	1800
Angle θ_3	800