空気圧シ リンダの船直方向位置およびカの同時制御峰

山藤和男軸 福島哲治。鱒

Simultaneous Control of Vertical Position and Force

of a Pneumatic Cylinder
Kazuo YAMAFUJI, Tetsuharu FUKUSHIMA

Recently, pneumatic cylinders and DC servo-motors have become the most favorite actuators utilized as
Z axis (vertical axis) actuators of industrial robots. When a robot performs such works as assembly, polishing and deburring, position, together with force of an end-effector or a tool connected to the Z axis must be controlled. Although a linear motion mechanism driven by a DC servo-motor and a ball-screw can provide an excellent positioning accuracy, it is not satisfactory in allowing wide change of force. On the other hand, a pneumatic cylinder has inherently good controllability as to force because of compressibility of air, but it is inadequate for positioning.
In order to achieve accurate positioning and force control, together with simultaneous position and force control of a cylinder for the Z axis actuator, a pneumatic servo-system composed of a cylinder installed vertically, double electro-pneumatic proportional control valves, and sensor feedback equipment has been developed. Optimal control methods with and without an integral compensator and micro-computer control have been applied to the system. Optimal feedback coefficients derived from Riccati's equation expressed in a digital data system are chosen so as to minimize settling time without overshoot in the step response of position and force of the piston, respectively.
Two types of simultaneous position and force control methods are proposed. Experiments show that the integral type optimal control can provide satisfactory results in positioning as well as in force control. Furthermore, one of the simultaneous position and force control methods—a method which gradually diminishes feedback gains in the final stage of the control—gives excellent results.

1.緒 言

最近,組 立用ロポッ トのZ軸(鉛 直軸)用のアクチュ
エータ として,高 精度位置決めとともに広い範囲の高
精度力制御が可能なアクチュエータの開発が緊急の課
題となっている.現 在,組 立用 ロポッ トのZ軸 用アク
チ ュエータとしては,空 気圧シリンダかボールねじ送り方式の㏄ サーボモータが多 く用いられている.前者は空気の圧縮性を利用 した推力制御には適 しているものの,位 置決め精度の点で後者に劣 り,後 者は高精度位置決めはできるが,広 い範囲の力制御には不向きである。

**II iz. li/t29UEEt itifq$1.111114 (AT", it 011#L141-5) Vt, ft:MizEct Liti.:29tliE9^ 09)111)3044.1Mtai1k.Thl, 577*1.-
7.1)tz 1).
Aziiff5tit, {AIL t izIV1 , T$1111111to Z NAT 1-_-m—ci)INIft,kifift(JL 1,-C, iMizItti-tzz..
9 :/ 5' k .1±941# U4D,I-C2/I,E€4,--,-ftwfwelit 1,, ilititt/3411MottIMMAizikiltifHafia)kiel UT, e A 1- :/t2 'Y MAXL)30$1JOCV---i-Dt.:.

2. fiLT,tft-qaMant*5411%-elitki*IV) *MtklaV&O,

E1 11z7T:t29tEE-1--1:*ez.-Dtil-t144fit.ff-5. [Its:64] P: i. 9 .3"VOEEt (a8n), v: F./9 : / 3fory4flt, A: e A 1- :/o)Itffffiti, G : 211,a) um', m :izinthswi, V : e A t- /0A/1,C.: Mtt*140f35z, F: , — 0 :4011111i, F : M43, F9: e A /- :/ot±h, r, : ijo) HIM, x : eA 1- :/Ot

"昭和62年6月22日 原稿受付
幡電気通信大学機械制御工学科

(所在地 〒182調 布市調布 ヶ丘1+1,電 気通信大学機械制御工学科)
樋◆ソニー株式会社

油 圧 と 空 気 圧 227

Fig.1

髪
ク
m

lG
1 亀

家橘

1

介

渥

A2

'2 聖2
舟

↓

F

Modellingofthesystem

位,r.:位 置の目標値,U:比 例弁の制御電圧,x:空
気の断熱指数,R二 空気の気体定数,T:空 気の温度
(絶対),P、:大 気圧(絶 対),t:時 間,T,:サ ンプ
リング時間,Wx:状 態量に対する重み行列,Ru:制 御入力に対する重み行列.
添字1は ピス トンの押 し側,2は 引き側を示す.
2.1位 置制御系
両シリンダ室内の空気は断熱変化をすると仮定すると,

G一 κ翫 票+{絵 哩(1>

ら「 論 砦+詮 哩(2}

ピス トンの運動方程式は,鉛 直下方を正として,

暗 署+c・v-A,(P,-P・ 〉-A・(P・-P・)
十F十mg-Fcsgn(v>(3)
式{1ト イ3}を基準状態か らの微小変化 に対 し して線形化す る と,

dlG,ニc糞 δP茎十a韮6v の
cSG2=-c26P2十a261v
=n6>+C,6rvニA塵 δP1
-A2δP2十 δF

(4a)
(4b)

(5)
ここに,基 準状態における値について,添 字0を つけ,

c三=V塞 登/κRT●gc2=V20/κRTo
a垂=P憩AL/RT②,a2=P20A2/RT。

とする.両 比例弁の特性を同 じと仮定 し,圧 力変化に対する重量流量の変化率をAndersen2)お よび則次ら3} に従って,

一器={塗 一編とおき・

第19巻 第3号

さらに,弁 の入力電圧に対する重量流量の変化率を

籍{舞 聯 く・

以上より廊 こ黙 謙}⑥

式㈲ を式(4)に入れ,さ らに これ と式⑤ をラ プラス変換して整理する と。 δv→V(s),δu→U(s)と して,
B

+s・+弩鴇 耐 ・F(s)

上 式 で,alニa2=a,Cl=c2=cと 仮 定 し, Bi=Aikq/mc,B2=A2k♂mc
B3=1/m,D=kp/c

Wn=d9+象+2amc
ζ=(mkp十C4c)
/2mCdkp+1十:aと した.
2.2力 制 御 系
ピス トンの力出力Fpは,
Fg=Al(P,-P,)
-A,(P2-Pa)十F十mg

(7)

18》
これ も基準状態 からの微小変化 に対 して線形化を行 うと,
dFp=AidPi--Aヨ δP2(9》
力制御の場合,ピ ス トンの速度 をdV≒0と して よいか ら,式(4)よ り,
∂G1==c16P,,δG2=-c,dP2(1①
式(6).(9)。ao}を用いて力 と電圧の関係 を求め,そ れをラプラス変換 する と,

Fp(S)一 轟U・(S)+轟U・(S)aD

こ こ に,Cl=c2=c,B,=Aヨkq/c,
Bs=A2kq/cと す る.
2.3状 態方程式
式(7》,aDを 時間領域の式 に戻 し,さ らに力の式 をtで微分 し,
の

Xl=rx-X二 位置偏差,X2・Xl, X3ニX2e X4=Fp,x5=薫4
とお い て状 態方程式に直す と,

1総 奮)+BU(t)}
こ こ に,

一 55一

a2)

228 山藤 ・福島 空気圧シリンダの鉛直方向位置および力の同時制御

X=

u=

真
2
8
4
8

X
X
X
X
X

,A=

Ul(t)
Ua(t)
Fω
Ua〈t)
Ut(t)

,B・

ハU
ハU

轟U
ハU
hU

0
0
0
0
一 ζ

〇《

V
O

《U

《U

酬

轟U

-《冒ーハ

U

酬 一 2

1

0一〇〇
0
0
0
0

る 臨

0
0
0
0
B

コ

0
0
B
O
O

き

0
0
B
O
O

O
O
B
O
O

ー

《V

nU

ハU

l

AU
ハU

ハU
ハU

-
鳳

nU

C コー

式(7)中の右辺第3項 のBsは 本システムのパラメーク値を入れて計算すると,非 常に小さ くなるので第3項全体を無視する.表1に 計算に用いたシステムパラメータの値を示す.計 算により,こ の系は可制御であることを確かめた.次 に肇状態方程式を離散時間系で表す.サ ンプリング時間T、の離散時間系で,時 刻tニ kT、における各変敬をkの関数として表すと。

難 繍Xω+QU(k)}a3}

とな る.こ こ に,P;exp(ATs>,
Q驕 ∫ 計exp(AT》dt・B
P,Qは サ ンプ リング時間Tsの 関数で,無 限数列 となる
が,こ れらの算定 プログラムでは,(AT.)N/N!の 値が 10"6以 下 にな っ た と ころ で計算を打切 っ た.

3,最 適制御法の適用 と最適フィー ドバック
係数

式③の系に,最 適制御法を適用することとし,次 の二乗形評価関数Jを極小にするような制御入力U(k)を求める.

TablelSystemparameters

parametα sy鵬bo1 di蒲e麩sio籍
now『atei轟 「efαe㏄estate Q 80N1加i籍
pressureran8e(") P 0.39MP識
refer8nce8troke St 80■ ■
vigに01鳩伽 叩i㎎coeffi¢ient Cd 0,069Ns/■
refer㎝cepressur8 Po 0。49MP3(abs)
refere轟cete即erature To 300K
鵬assofmovl㎎part 類 2.0㎏
pistonarea(rodside) A1 1056.8ゴ
pisto轟area(headside) A2 1256.6げ

コ

J・ Σ(WxX(k十1>2+RuU(k>2〕ao k=o
WxとR。 は非負の重み行列である。評価関敬の中でX (k+1)3は 状態量の二巣偏差を衰わす、U(k)St.考 慮しているのは。過大な制御入力を遵けるためである。 Jを最小にする最適制御則は,
U(k)=・-GX(k)(面 で与えられる4).
こ こ に。G={R.+Q7HQ)""iQτHP
で あ り。Hは 次の リカ ッチ方穏武の解である。 H(k+1)=P'H(k》P-PTH(k》Q〔R.
+QτH(k)Q)"SQ「H(k)P+W.
H(0)=W瓢(k=e,1,2,鱒 一)

ao

なお。P,,Q了 はそれぞれP,Qの 転璽行列である。 最
適制御 では。 外乱入力があ る と出力 は0と はならな し.
さ らに,出 力 を目標値変化 に追従 させる こ とはで きな
い.そ こで,次 に最適制御 に積分を付加 した積分型最
適制御 を考え る.
E(k)xr。f-Y(k>g(ref=r:ま た はrf)
A(k)=U(k十1)-U(k》 α◎

とお いてr(k) =X(k十1)-X(k)

r(k+1)
E(k+1)

なる拡大系を得る。
む
」 (A)=Σ(E(k)iw霧E(k)k =e

十A(k)TR.A(k)〕

P,or(k》

-C 。IE(k>

+3}・(k>

この系に対 して,

ag

な る評価関数 を考 える.こ こ に,W.,Ruは 非負の対称
行列 とす る.」(A)を 極小 にす る最適入力 は,
r(k)A
CPt(k}=(-G,-G韮 〕E(k)

で表 される.し たがっ て,Acpt(k)よ り得 られ る,も との制御入力UePt(k),つ ま り積分型最適制御の制御 則は,
k-1U
。 Pt(k)=-GX(k)-G,ΣE(i)
i"1
+〔U。(0)十GX(0)〕 α0

4.実 験装置 と実験方法

実験装置の概要を図2に 示す.空 気圧シ リンダ(ストローク155蘭,内 径50糧,メ タルシール)は ロッ ドを下向きにして,鉛 直に設定 してある.ロ ッド先端には
カセンサ として半導体荷重変換器と位置検出用にデジ
タル式 リニアスケール(分 解能20μm}の 読み取り用光

一一 56-一 昭和63年5月

油圧と空気圧 229
Fig.2]Experimenta監pneumaticservo
禰system
センサが取り付けてある.
比例弁は圧力タイプのものであり,空気源の圧力を
0.74～0.76MPa,比例弁の二次圧力を0,39MPaに設定
した.本実験では,パーソナルコンピュータ(PC-9801
Vm2+i8087)を用いて,制御部分はすべてソフトウェ
アによって制御を行った.プログラムはC言語で書か
れている.
5.最適制御法による位置決め実験結果
最適制御法では,重み係数を任意に決めて,リカッ
チ方程式を解くことにより,その ■ みに対する最適レ
ギュレータが得られる,重み行列は対角線要素のみを
もつものとし,
diag(Wx>rc(w,o,o,w)
diag(Ru)m(r,r,r,r)とした.
5.1最適制御の実験結果
制御入力は,
u覇(k)=-kai〔Xt(k)-rx〕-ka2x2(k)
-knsXs(k)十u㌔
Ub(k)=-kM〔Xl(k)-rx)-kb2Xs(k)
-kbsXs(k)十u㌔
ここに,k。,kbは比例弁A,Bに対するフィードバッ
ク係数で,添字1,2。3はそれぞれ。Xl,x2,x3に
対するもので,u'、,u㌔ はそれぞれ,弁A,Bに関する
バイアス電圧である.位置制御のブロック線図を図3
に示す.破線で囲まれた部分はソフトウェア演算部で
ある.本節では,積分なしの最適制御であるから同図
において,kaO=kbO=0とする.
(1)サンプリング時間3ms～10msの結果:
入力の重みr=1,状態量の重みw=105のときの最
適フィードバック係数を用いて,サンプリング時間10
msで制御した結果を図4に示す.ほぼ同じフィード
バック係数で,サンプリング時間を3msとして実験し
た結果を図5に示す.いずれも,位置の目標値を100m
としたステップ応答の結果であるが,整定時間と定常
偏差のいずれに関しても,サンプリング時間3msの方
が10msの場合よりもすぐれている.本実験に用いた空
気圧サーボ系全体の周波数応答試験によれば,ゲイン
が一3dbとなる周波数は2Hz程度であり,比例弁の
L J
Blockdiagramofpositioncontrol
∈100 芒④∈ 7
8
0五〇 も
0
0.75
times
1.5 2.25
Fig.3 Fig.4Stepresponseinoptimalposition
contro1(Ts=10ms)
第19巻第3号一57一

230 山藤 ・福島:空気圧シリンダの鉛濃方向位置および力の同時制御
0
7
・
0
7
1
Eε宅
o∈Φ り 〇五いう
OO・751・5
価mes
F吃.5Stepresp◎nseinoptimalp◎OiU◎n
control(Ts=3鵬s)
1
`〇一言£と⑳ も
deviation
Flg.7Distributien◎f
mm
positioning
deViationinintegraltypeoptimal
control
時定数もこれらのサンプリング時聞に比べてかなり大
きい.それゆえ,T覇=3msと10msとしたときの結果に
はあまり差がないと思われたが。結果的に短いサンプ
リング時間で状態量を検出して小刻みに制御をかける
という点で3msの方がよい結果を与えるのではない
かと思われる.
(2)繰り返し位置精度:停止位置の再現性を調べる
ため,位置決めのステップ応答試験を行った.最適
フィードバック係数として,任意の重み係数に対して
計算されたフィードバック係数のうち,整定時間が小
さく,オーバシュートを生じないものを選んだ.さき
に,山藤ら5,は水平に設定した空気圧シリンダについ
て連続時間系で最適制御を行って,ステップ応答の整
定時間が短く,オーバシュートを生じない重み係数を
とる方法を提案している.本実験ではr=1,w=105と
選んだ.図6には目標値100muについて30回測定した繰
り返し精度の分布を示すが,最適制御のみではややば
らつきが大きい。
5.2積分型最適制御の実験
前節と同様に,種々の重み係数に対して計算された
最適フィードバック係数を用いて,ステップ応答試験
を行い重みの効果を評価した.k。。,k,。は非常に小さ
10
5
∩
V
C
O旧一コρ 榴と辺◎
_1.0
o一
m
01・O
de》iotionmm
F嬉.6Distributionofpo8itioning
deviatio鶏ineptimalcontro嚢
く,lO　 3のオーダであるので。制御開始時から積分をか
けている.また,Ts=3m&k"。=k.とする。図7に
は目標値100iamについて。30回測定した繰り返し精度の
分布を示す.図6と比べて偏差はやや改善されている。
6。積分型最適制御法によるカの突験結果
力制御では,積分型最適制御法のみを適用した.こ
のブロック線図を図8に示す。図において,破線内は
ソフトウェア演算部分である.この場合の制御入力は,
u葛(k>=-k糾 〔x、(k》-r∂-kssXs(k)
ヒのゑ
一k 舗 Σ 〔x4(i)-rf)十u'鶴
…灘1
Ub(k)=-kN(x、 〈k)-r{)-kb、x、(k)
はのま
一k beΣ 〔x4(i)-rf〕+u㌔
i=1
となる.ここで,Xsは力の時閥変化率,つまり力速度
である.サンプリング時聞3msのとき,入力の重みを
diagR樋=(r,r,r),状態量の重みをdiagWz=(o,o,
w),r=1,wニ3とした場合の実験結果を図9に示
す.同じフィードバック係数を用いて,力の指令値を
100Nとして30回測定した結果を図10に示す.
門 「
一58一
L
Fig.8
」
B1㏄kdiagramofforcecontrol
昭和63年5月

油圧と空気圧 2Sl
z
100
00 5 0 」 ε
0
14252。25
timos
Fig.9Stepresponseinintegraltype
optirnalforcecontro1
10
5
C◎εコρ℃劇 ω 欄 ℃
0一4.9 04・9
deviationN
Fig.10Dist】dbutionofforcedeviationin
integraltypeoptimalcontrol
7.位置およびカの同時制御実験
7.1実験方法
空気圧シリンダのピストンロッドでコイルばねを圧
縮することによって,位置と力の双方を変化させ,位
置と力の同時制御を行った.この場合,力制御と位置
制御は両システムの構造の違いから,同じ最適レギュ
レータを用いることができないので,両制御を時間的
に切り換え,別の制御系として各々の最適レギュレー
タを用いて制御した.制御方法として,次の二通りの
方法を試みた.
(1}同時制御法A:位置,力にそれぞれに,最終偏
差の許容範囲を与える.位置偏差をex,力偏差をefと
し,位置と力の許容範囲をそれぞれ,Mx,M,とする
と,e。,etの符号の正負により,(a)e。,efが同符号の場
合と,(b)異符号の場合がある.
(a)の場合は位置,力ともにまだ不足しているか行き
過ぎているかのどちらかである.この場合,不足して
いる場合が先に生ずるので位置,力ともそのまま制御
をつづけても問題はない.
(b)の場合,例えば位置が行き過ぎているが力は不足
していたり,力は十分であるが位置は不足するという
第19巻第3号
ことが起8る.その際,一方を無理に修正しようとす
ると,他方が振動を起してし紫うことがある.そこで,
ex,etの絶対値をそれぞれの許容範囲M。,M,と比較
し,許容範囲内にある方の最適フィードバック係数の
うち,比例フィードバック係数を0.998倍して小さくす
る.
この操作により,最初は振動を起していても,何回
かこの操作を繰り返すうちに安定させることができる。
その闇に,他の一方を修正することになる.比例フィー
ドバック係数のみを一回ずつ小さくしていく理由は比
例項が制御に最も大きな影響をもつためである.この
ように対象物によって位擢,力それぞれの許容範囲を
適当に設定することにより,同時制御が可能になる.
この方法のフローチャートを図11に示す.
② 同時制御法B:本方法では最初に位置決めを行
い,次に力制御を行う.位置の指令値τ。に対して,偏差
exの絶対値が指令値のα%以内になったら,位置制御
から抜け,その時点から力制御を開始する。力制御を
行っている間,位置についてはその変化をデータとし
て観察している.そこで,外力が加わると,ロッドは
上り,位置偏差が大きくなる.もし,その絶対値がrxの
β%を超える場合,今度は力制御から抜け,再び位置制
御に入る.σ,β の値を適当に設定することにより,位
置の指令値のある許容範囲内で力制御を行うという同
時制御が可能になる.この方法のフローチャートを図
12に示す.
7.2実験結果
積分型最適制御法を用い,Ts=6msとして,前節の
方法に従って実験を行った.同時制御法Aによる実験
結果を図13に示す.図中に位置および力に対する比例
一59一
GTART)
1
ex=残一Xl
ef漏 η 一X4
、
! ↓
lp。siti。nc。ntr。1】 lf。rcec◎ntγ 。1}
Ne
xxef<0>
Y
Ne
x<Mx
Y
IklxO・998】
Ne
xxefくO
Y
Ne
fくMf
Y
lk4×0・9981
、
1
!
Fig.11 Simultaneousposition/force
controlmethodA

232 山藤。福島1空気圧シリンダの鉛直方向位置および力の同時制御
(STA郎)
夢唖
lP。5絹。hC。繭q
N ぐ襲ご'10
Y
lf。rc。酬 「。1】
e誕《騨'100 N
V
匿
芒
罫
編鐸博5
Fig.12 Sirnultaneouspositionlforce
controlmethodB
F善8。13Resultsofsimultaneousposition
andferceCORtrol(MethOdA》
(V
7
♂差劇 ε∈
むツヲ
oり2α署
0
offse重312・99
ノ/
ズ ＼ ρ。si奄i。ハ。ffset髭一〇、12
1♂.._一..一.響!
/ノ
/
/＼force
3.O
m
OO
ZΦり」
O
い
0
Fig.14
1る
times
45
Resultsofsimultaneouspos震t猛on
andforcecontrol(MethodB)
ゲインの時間的変化も示している.位置および力の目
標値は,それぞれ,60㎜ と100Nである.双方に行き過
ぎはあるが,最終的には小さな定常偏差に収まってい
る.同時制御法Bによる実験結果を図14に示す.力の
定常偏差は目標値の0.12%であるが,位置は13%とか
なり大きくなっている.
8.実験結果の検討と考察
8.1位置制御
(1}サンプリング時間の影響二各種の重み係数に対
してT、=3msと10msについて,定常位置偏差と整定
時間を測定した結果を表2に示す.表から,いずれも
T5ニ3msの方が10msの場舎に比べてすぐれているこ
とがわかる.その理由として,小刻みに状態量を検出
して制御入力を変えるということで,比例弁に対する
ディザ効果があるのではないかと考えられる.
② 最適制御法と積分型最適制御法の比較:位置決
めを90回ずつ行った結果を比較すると,定常偏差の平
均値では両者の閲にはほとんど差がない.標準偏差で
は積分型が積分なしに比べて%程度になっており.積
分の効果が現れている.一方,整定時間は積分型のほ
うが平均50%も大きくなっている.
㈲ 最適な重み行列の選択法:最適制御法において
は最適な重み行列をどのように決めるかということが
重大な問題である.実際には要求される制御仕様を満
足するように設計されるが,試行錨誤的な方法による
ことが多い。これには,前述のステップ応答時の整定
時間を小さくする方法s}などがある.この他に,Butter・
worthフィルタの周波数特性から決める方法e,,誤差評
価関数ITSEを用いる方法n,修正評価関数を最小にす
るように決める方法癖,などがある.
本実験ではステップ応答を利用する方法によった.
これにより整定時間や精度などの制御仕様のほか,制
御の安定性も評価できるという利点がある.
8.2力制御
サンプリング時間を3msとして,力の目標値を50お
よび100Nとして90回ずつ測定した結果をまとめると,
表3のようになる.表に見られるように力の積分型最
適制御では,整定時間のばらつきは比較的小さく,制
御の安定性も良好である.力の状態量に対する重み係
数は制御入力のそれと同じか,少し大きい位が良いこ
とがわかった.
8.3位置と力の同時制御
方法Aは位置と力の双方について,かなり満足でき
る結果を与えるが,方法Bでは力制御はすぐれている
カs・M密なtSZUt決めは蹴である・ これ}ま方法B翻
位置が目標値に達したのち,力制御のためにシリンダ
室の圧力平衡をくずしたとき位置が大きく変化し,力
を目標値に近づけた後に再び大きく変位したところか
一60-一昭和63年5月

ら位置決め動作を行うため,位置と力は発振を起しや
すくなるためである.方法Aでは両者がある許容範囲
内に入った後はそれぞれの比例ゲインを強制的に小さ
くするという,いわゆる感度低下の方法をとっている
のでこのような発振を防ぐことができる.
9.結論
(1}離散時間化した状態方程式に最適制御を適用し,
空気圧シリンダの位置および力制御を行い,実用に耐
える精度と安定性を実現した.
(2》評価関数に対する重みの最適値は,ステップ応
答時の整定時聞が小さく,しかもオーパーシュー影も
生じないという条件から決められた.その結果,制御
入力の重みをr=1とした場合,状態量の重みは,位置
の最適制御ではw二10。～108,積分型最適制御では(1
～5)*108,力の積分型最適制御では0.5～5.0が最適
であることがわかった.
(3}サンプリング時聞T。=3～10鶏8について実験
を行ったところ,位置では3ms,カでは3～6msでよ
い結果が得られた.
(4)位置と力の同時制御法どして,二通りの方法を
提案した.方法Aでは,目標値を次々と短時聞に変え
ない限り,振動を生ずることなく,位置と力を許容範
囲内に収めることができる.これは軸の穴への挿入や
多段圧縮などの作業に有利である.方法Bでは力制御
に重点をおいた制御はできるが,位覆と力の許容範囲
を小さくして短時聞に制御しようとすると発振を起す
ことがあり,方法Aに比べて安定性に欠ける.
参勾文献
1)山藤和男:絹立用ロポットZ軸の位置および力制
御,昭和60年度糟機学会春季大会学術講演会論
文集,1,21/22(1985)。
2) B. W. Andersen: The Analysis and Design of 
 Pneumatic Systems, 53/58, John Wiley & Sons 
 (1967).
3)則次俊郎,花房秀郎:空気圧シリンダのパルス幅
変調方式速度制御一低速駆動時における一定速度
送り一,油圧と空気圧,14-7,61/68(1983).
4)高橋安人:ディジタル制御,岩波書店(1985)。
5)山藤和男,小林義武,石橋昌宏:空気圧シリンダ
の最適制御,日本機械学会論文集,C,53-487,
757/762(1987>.
6)秋田正,内山隆ほか2名:オブザーバを用い
た高速移動台,第19回SICE学術講演会予稿集,
369/370(1980).
7)阿波啓造,新井泰彦,倉田忠雄:操作量制限を受
ける油圧シリンダ系の最適サーボ機構,油圧と空
気圧,18-3,232/238(1987).
8) Q. Feng and K. Yamafuji: Design and Simula-
 tion of Control Systems of an Inverted Pendu-
 lum, Robotica (in print) .