繰返し制御を用いた DD アーム制御

正 員 小 山 純 (長崎大)

准 員 高 田 隆 司 (長崎大)

正 員 樋 口 剛 (長崎大)

正 員 阿 部 貴 志 (長崎大)

正 員 山 田 英 二 (長崎大)

Control of a Direct-Drive Arm Using Novel Repetitive Control

Jun Oyama, Member, Ryuji Takada, Associate, Tsuyoshi Higuchi, Member, Takashi Abe, Member, Eiji Yamada, Member (Nagasaki University)

A direct-drive (DD) arm system is one of the most attractive and interesting research subjects in the field of robot engineering. Up till now, many DD robot arm systems with vertical axis have been adopted for industrial applications, but very few systems with horizontal axis because of the difficulty to reduce the speed fluctuation caused by the arm weight. The PID control without any additional control process has very poor response characteristics because of the continuous load fluctuation and the time delay in the system. The accuracy is consequently, not satisfactory. Therefore, we proposed a repetitive control with learning process (position-memory type) to drive the horizontal axis robot arm with constant speed, which is based on the periodicity of the arm action.

We apply this control method to the position control in which the arm reciprocates between arbitrary two points. We propose a novel control strategy in which time-memory type learning process is introduced in combination with the position-memory type learning process in order to improve the positioning accuracy. We also discuss about self tuning of the compensation rate in the system.

The control method is very simple and powerful. The availability of this repetitive control method is compared with experiments.

キーワード：ダイレクトドライブ(DD)アーム，繰返し制御法，周期変動負荷，時間記憶方式

1. ま え が き

ダイレクトドライブ (DD) アームは，産業用ロボットのモーションコントロールの分野において最も興味深い研究対象の一つである。DD 方式はギアなどの減速伝達機構を用いたものに比べ，高剛性で摩擦による損失が少ないという利点をもつ。その反面，外乱や負荷重量の変化による影響を受けやすいという欠点があり，高速・高精度の制御を行うにはこれらの影響を抑えることが必要である。

一般に，DD 方式のロボットアームは水平方向の運動に多く用いられているが，垂直方向の運動にはあまり利用されていない。これは垂直方向はアーム重量による重力の影響によって速度変動が生じるため，この変動分を抑える必要があるからである。そのためこのような変動負荷時に従来から用いられている PID 制御を用いる場合ゲイン調整は難しく，そのため応答性が悪く精度も低くなる。そこで著者らは，これを改善するためにロボットアームが繰返し動作を行うことが多いことに着目し，その周期性を利用する繰返し制

御法を提案した⁽¹⁾。

この繰返し制御は、前周期のトルク指令を時間遅れを考慮した位置の関数、または時間の関数として記憶し、次回の補償量として用いる制御法である。本論文では、この制御法を用いた DD アームの速度制御、および位置制御について実験的検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 位置情報を用いた繰返し制御

〈2・1〉 速度制御 垂直方向の運動を行う DD アームの原理図を図 1 のように示す。この場合のアームの運動方程式は次のように表される。

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = K_t I_t - mgl \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 J ：慣性モーメント、 θ ：アームの

図 1 DD アームの原理図
Fig. 1. Principle of DD arm.

位置、 $K_t I_t$ ：モータのトルク出力、 m ：アーム重量、 l ：アームの長さ

この式から明かなように、モータの出力すべきトルク量はアームの位置によって常に変動する。このような場合、アームを定速回転させるため PID 制御を用いても状態量の観測に要する時間遅れなどの影響で速度変動が残ってしまう。そこで、繰返し制御を併用させることによってこの時間遅れに対する補償を行う。

図 2 に繰返し制御を導入した場合の速度制御の構成図を示す。このときトルク電流指令 $I(\theta)$ は次式で表される。

$$I(\theta) = I_L(\theta) + I_{PID}(\theta) \quad (2)$$

ここで、 $I_L(\theta)$ ：繰返し制御補償量、 $I_{PID}(\theta)$ ：PID 制御操作量

また PID 制御量の時間遅れ Δt はアーム位置の誤差として次のように表される。

$$\Delta \theta = \omega \Delta t \quad (3)$$

ここで、 ω ：角速度

(3) 式による位置の誤差を考慮に入れて、トルク電流指令は次のように表される。

$$I_{(n)}(\theta) = I_{L(n-1)}(\theta) + I_{PID(n)}(\theta) \quad (4)$$

$$I_{L(n)}(\theta - \Delta \theta) = I_{L(n-1)}(\theta - \Delta \theta) + I_{PID(n)}(\theta) K_L \quad (5)$$

ここで、 n ：アームの n 周期目のデータ、 K_L ：学習係数 ($0 \leq K_L \leq 1$)

(5) 式において学習係数 K_L を用いて記憶する PID トルク指令値の割合を決定する。

図 2 速度制御の構成図
Fig. 2. Block diagram for velocity control.

図 3 位置制御の構成図
Fig. 3. Block diagram for position control.

〈2・2〉 位置制御 図3に繰返し制御を導入した場合の位置制御の構成図を示す。位置制御は速度制御ループの外側に更に位置指令ループを付け加えたもので、図4の位置制御関数によって位置偏差から速度指令を作つてPID制御を行っている⁽²⁾。

繰返し制御は位置決めを行う任意の2点間を1周期として速度制御の場合と同様に行うが、指令位置付近でのトルク量の記憶方法には工夫が必要である。記憶量は位置の関数となっているため位置決めの際、指令位置付近で振動が起きると、アームが同じ位置を何度も通るため記憶内容が書き換えられ最終情報のみが記憶されるので、次周期での指令位置付近での制御が不安定になる。この問題を改善するために次の二つの記憶方式を提案した⁽³⁾。

図4 位置制御関数
Fig. 4. Transfer function.

図5 二重記憶方式
Fig. 5. Double register type.

図6 位置+時間記憶方式
Fig. 6. Position and time memory type.

(1) 二重記憶方式 この方式は位置関数による記憶レジスタを二つ用意し、図5に示すようにアームが正の方向に動いている場合はレジスタ1に、負の方向に動いている場合はレジスタ2に記憶する。

(2) 位置+時間記憶方式 この方式はアームが振動する場所での記憶を時間の関数として行うもので、式に表すと(5)式において θ を t に置き換えたもので

$$I_{L(n)}(t-\Delta t) = I_{L(n-1)}(t-\Delta t) + I_{PID(n)}(t)K_L \cdots \cdots (6)$$

となる。

図6に示すように、指令位置の手前までを位置の関数として記憶し、それ以後を時間の関数として記憶している。

3. 実験結果

〈3・1〉 実験装置 実験は図7に示すような出力2 kW、100 V、20 Aの直流他励電動機に、先端に1.5 kgの重りをもつ長さ20 cmのアームを取り付けた装置を用いて行った。

図8にシステム構成図を示す。パワー部は三相電流をダイオードブリッジによって整流し、平滑回路を通したのち、ゲート信号で動作する4象限チョップで直流電動機を駆動させている。制御用マイコンはASC-88 Bを使用し、12ビットのロータリーエンコーダにより1 msごとに位置検出・速度検出を行い、位置偏差から速度指令を作りPID制御を行っている。使用するPIDゲインはアームに重りを取り付けでない状態で定速度運転を行い、速度偏差が最小になるように設定し、実験ごとの調整は原則として行わなかった。これはロボットアームの負荷条件が変わりやすい状態を考慮して、そのつどPIDゲインの変更を行うのではなく、制御精度の改善を繰返し制御側だけで行うこと

図7 テストアーム
Fig. 7. Test arm.

図 8 システム構成図
Fig. 8. System configuration.

(a) PID ゲイン調整

(b) PID ゲイン未調整

図 9 速度制御の実験結果
Fig. 9. Oscillogram at velocity control.

を目的としたためである。繰返し制御は回転子の 1 回転を 256 分割したテーブルに 2 ms ごとに記憶を行い (ただし、時間記憶の場合は 400 個用意したテーブルに 12 ms ごとに記憶を行う), 同時に繰返し補償量を出力する。

〈3・2〉 速度制御 図 9 に指令速度 30 rpm の速

度制御の実験結果を示す。(a)図は〈3・1〉節で説明した PID ゲインを用いて実験した結果であるが、実験開始後 4.5 秒までは PID トルク指令のみの出力であるのでアーム重量による速度変動に追従しきれずに ± 6 rpm の速度偏差が生じている。繰返し補償量が出力され始めると PID トルク指令は減衰し、それに伴

い速度変動も改善され $\pm 1 \text{ rpm}$ までに抑えられている。(b)図はPIDゲインが大きく外れている場合を想定して、わざと速度偏差を大きくした場合に繰返し制御を導入した場合の実験結果である。(a)図の場合と比べて収束時間に差はあるが同様の制御精度が得られている。このことから繰返し制御を用いればPIDゲインの調整が不正確でも十分に制御精度を改善できることがわかる。

繰返し制御で速度制御を行う場合(5)式の学習係数 K_L の値は速度変動改善の速さに比例し、収束が最も速いものは $K_L=1$ の場合である。

〈3・3〉位置制御 実験は図4の位置制御関数の最大速度を 30 rpm とし、アームの最下点を 0 rad とし反時計回りを正方向として行った。

図10にアームを $\pi/8 \sim 3\pi/4$ 間を往復運動させた場合の実験結果を示す。アームはそれぞれの指令位置に2秒間停止するように設定した。(a)図はPIDのみ

(a) PID制御

(b) 繰返し制御

図10 位置制御の実験結果
Fig. 10. Oscillogram at position control.

の場合、(b)図は繰返し制御を導入した場合である。 $3\pi/4 \text{ rad}$ に位置決めが行われた際に(a)図は速度波形に乱れが生じ、(b)図はそれが改善されているのがわかる。

この図では指令位置付近でのアームの動きがわかりにくいので、縦軸および時間軸を拡大したものを以下に示す。波形はそれぞれ制御開始2周期目のものである。図11を見ると明らかなように、PID制御のみでは時間遅れのためオーバーシュートが発生している。このオーバーシュートは図4の位置制御関数で指令速度の上限や減速位置を変えることによって抑えることができるが、位置決め時間を遅くすることになるので、この状態でオーバーシュートをなくすことを考える。

図12は、さきに述べた指令位置付近での記憶方式を用いていない場合である。前周期でのアーム振動のため最終情報に乱れが生じ、指令位置で振動が起きている。これを改善した二つの方式による結果を図13、図14に示す。どちらの方式でもオーバーシュートが改善され、良好な結果が得られている。位置決め精度の点からみると、この二つの記憶方式の優劣はつけがたい。しかし、動作を繰り返し続ける周期安定度の点から考えると、二重記憶方式は微小振動や外乱などの発生の場合にアームの回転方向の判断に誤りが生じる可

図11 PID制御
Fig. 11. Step response at PID control.

図12 記憶方式の補償のない繰返し制御
Fig. 12. Step response at normal repetitive control.

能性が高く、位置+時間記憶方式が周期安定度は高い。

〈3・4〉 補償量の最適化 速度制御の場合、繰返し制御を導入すると、最終的に全体の制御量は繰返し補償量にとって代わり、PID トルク指令はほぼ 0 となる。それに対して位置制御は、図 10 に示すように始動・停止時の速度変化などのために PID 制御量は 0 になることはない。また、アームの状態が同じでも指令位置が違えば位置決めの際のトルク出力も変化する。例えば、指令位置が 90 deg の場合は下方への重力が制動トルクの助けとなり停止しやすくなるが、180 deg の場合は重力は始動トルクにはほとんど影響

図 13 二重記憶方式による繰返し制御
Fig. 13. Step response at improved double register type repetitive control.

図 14 位置+時間記憶方式による繰返し制御
Fig. 14. Step response at improved position and time memory type repetitive control.

図 15 学習係数と制御精度の関係
Fig. 15. Compensation factor for response characteristics.

しない。このため、位置制御では(5)式の学習係数 K_L の値の設定が制御精度を左右する重要な要素となってくる。

図 15 に示すように、学習係数の値が小さい場合には時間遅れが完全に改善されずオーバーシュートが残ってしまうが、逆に大きい場合はアームの立上りが鈍くなってしまう。各指令位置に対して最下点 0 deg から任意の指令位置に位置決めを行った場合、最も精度が良く、周期安定度の高い学習係数 K_L の値を調べた。その結果を図 16 に示す。90 deg を最下点とする V 曲線となり、アームの速度が高いほど値が大きくなっている。よって、任意の指令位置に対してこのように学習係数を設定すれば良好な制御が行えるのであるが、この値はアーム重量、位置決め速度など数多くのパラメータによって変化するので、そのつど外部から調節し直すのは困難である。

図 16 の結果を見ると、最適な学習係数の割合は補償を行わなかった場合のアームのオーバーシュート量と関係があるように思われる。この関係を利用して学習係数を自動設定することを考える。PID 制御のみで

図 16 指令位置と学習係数の関係
Fig. 16. Compensation factor for commanded position.

図 17 オーバシュート量と学習係数の関係
Fig. 17. Compensation factor for overshoot.

図 18 外部入力による学習係数を用いた繰返し制御
Fig. 18. Step response at manual setting repetitive control.

図 19 自動設定による学習係数を用いた繰返し制御
Fig. 19. Step response at automatic setting repetitive control.

90~180 deg の指令位置に対して 20, 30, 40 rpm で位置決めを行った場合に発生するオーバーシュート量と、先ほどの実験で求められた最適な学習係数の関係を図 17 に示す。位置決め速度に関係なくほぼ直線的な比例関係があることがわかる。この図より、前周期のオーバーシュート量から次周期の学習係数を次式を用いて決定する⁽⁶⁾。

$$K_L = K_{ov} M \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 M : オーバシュート量, K_{ov} : 比例係数 (本研究では $K_{ov} = 0.115$)

学習係数は周期ごとに更新され、位置決め精度が向上するに従って小さくなっていく。

この式を用いたものと、外部から学習係数を入力したものとを比較するために、指令位置を $5\pi/8$ として実験を行った。なお、記憶方法は位置+時間記憶方式を用いた。図 18(a) に外部入力による学習係数を用いた繰返し制御を導入した場合の 3 周期目のステップ応答波形を、また、図 19(a) に自動設定による学習係数を用いた繰返し制御によるステップ応答波形を示す。どちらも同程度の精度での位置決めが達成されている。これにより、(7) 式の関数による学習係数が適切な値であることが証明された。

図 20 衝突実験図
Fig. 20. Disturbance test.

また、この方法を用いるもう一つの利点として、正しい位置決めが行われると学習係数は 0 となるので、それ以上記憶量に加算されるものがなくなり、周期を重ねることによる補償量への誤差の混入を防ぐことができる。図 18(b)、図 19(b) にそれぞれの場合の 15 周期目のステップ応答波形を示す。外部入力の場合は 3 周期目と比較すると、立ち上がりの速度が鈍くなっている。それに比べ自動設定の場合は 3 周期目と変わらない波形となっている。

(a) 外部入力による学習係数

(b) 自動設定による学習係数

図 21 衝突に対する安定度

Fig. 21. Step response repetitive at control with disturbance.

次に、外乱に対する安定度を調べるため指令位置での衝突実験を行った。実験は指令位置を 135° とし、繰返し制御が十分に安定してから図 20 に示すように指令位置でアームを板に衝突させ、それを取り除いた後、次周期のステップ応答波形をとった。図 21(a) に外部入力による学習係数を用いた場合、(b) 図に自動設定による場合を示す。(a) 図は前周期での衝突によるトルク量の乱れが記憶量の中に含まれたために位置決め精度が落ちている。自動設定の場合は、制御が安定しているときは学習係数は 0 となっているので衝突が起きても新たに記憶量が加算されることはなく、次の周期もそれまでと変わらぬ精度で制御できている。このとき衝突によって学習係数値は変化している。しかし、制御が良好に行われているので PID トルク指令の出力は最小限に抑えられており、このことによる記憶量への影響はない。

4. ま と め

DD アームの垂直方向運動などのような周期変動負荷時における制御に繰返し制御を提案し、その有用性を実証した。その要旨をまとめると以下ようになる。

- (1) DD アームの速度制御に繰返し制御を導入す

ることによって、PID 制御のみの場合と比べて速度変動を $1/10$ に抑えることができた。

- (2) トルク量の記憶方法を時間の関数とすることで位置制御にも応用でき、位置決め精度が高まった。

- (3) 位置制御の場合の学習係数の設定をアームのオーバーシュート量より自動設定することにより、記憶量の積算誤差による影響や衝突などの外乱に対する影響を弱め、制御の周期安定度を高めることができた。

本制御法は単純ではあるが、負荷も周期的な変動がある場合のみならず、電動機のもつコギング特性の改善などにも適用できるものである。今後、本制御法の応用と適用範囲、安定性などについて更に検討していく予定である。

(平成 4 年 9 月 7 日受付, 同 5 年 3 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 小山・樋口・小杉・山田:「ロボットアームのダイレクト駆動における学習制御について」, 長崎大学工学研究報告, 18, No. 30 (昭 63-1)
- (2) 小山・樋口・川崎・山田:「学習制御を導入したダイレクト駆動ロボットアームの位置制御」, 平元電気学会大会, No. 1706
- (3) 小山・樋口・高田・山田:「時間記憶方式繰返し制御を用いた D・D アームの位置制御について」, 平 3 同上, No. 644
- (4) J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, R. Takada, E. Yamada: "Position Control of a Direct-Drive Arm Using Novel Repetitive Control", IAS CONFERENCE (1991)
- (5) 小山・樋口・高田・山田:「D・D アーム位置制御における繰返し制御の補償量自動設定に関する研究」, 平 4 電気学会産業応用大会, No. 181

小 山 純 (正員)

昭和 17 年 3 月 21 日生。44 年 3 月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。44 年 4 月同大学工学部助手。48 年 8 月長崎大学工学部助教授, 56 年 10 月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, パワーエレクトロニクスと電動機制御に関する研究に従事。IEEE 会員。

高 田 隆 司 (准員)

昭和 43 年 6 月 18 日生。平成 5 年 3 月長崎大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社, 現在に至る。工学修士。

樋口 剛 (正員)

昭和29年1月24日生。57年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月長崎大学工学部講師，59年10月同助教授，現在に至る。

工学博士。リニア誘導モータの設計に関する研究，パワーエレクトロニクスと電動機制御に関する研究に従事。

阿部 貴志 (正員)

昭和40年7月20日生。平成2年3月長崎大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月同大学工学部助手，現在に至る。工学修士。パワーエ

レクトロニクスと電動機制御に関する研究に従事。

山田 英二 (正員)

昭和10年9月10日生。39年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。39年4月同大学工学部助手。43年3月長崎大学工学部助教授，

49年1月同教授，現在に至る。工学博士。主として，パワーエレクトロニクスと電気機器の制御に関する研究に従事。IEEE Senior member，電子情報通信学会，計測自動制御学会会員。