

# EPOS

## Positioning Controller

### Application Note "フィード・フォワード位置制御"

Edition January 2004

EPOS 24/1, EPOS 24/5, EPOS 70/10  
Firmware version **2020h** 以降

#### イントロダクション

EPOS はインクリメンタル・エンコーダ付きの DC モータおよび EC (ブラシレス) モータ対応のモジュラー型モーション・コントローラです。数 W から 700 W のモータに対応します (ピーク出力 1750 W)。

位置/回転数/電流制御の多様な運転モードが、多くの駆動/オートメーション・システムにフレキシブルに適応します。内蔵の CANopen インタフェースが多軸制御と CAN (または RS232) マスターによるオンライン制御を可能とします。

EPOS の位置制御は一般的な PID 制御に加え、フィード・フォワード補正も利用できます。フィード・フォワード補正は、高加速度で大きな負荷慣性モーメントを駆動する応用、負荷が回転数に依存する (例: 摩擦負荷) 応用に多大な効果があります。

#### 目的

このアプリケーション・ノートは、加速度と回転数フィード・フォワード機能とその効果を解説します。

#### 必要なツール

EPOS GUI (Graphical User Interface) **Version 1.20** 以降。

- <http://www.maxonmotor.com> から無料でダウンロードできます。カテゴリ «Service» → «Downloads» → Order number 280937, 280938, 302267, 302287, 275512, 300583 を選択してください。

#### リファレンス

maxon motor EPOS Firmware Specification

- <http://www.maxonmotor.com> から無料でダウンロードできます。カテゴリ «Service» → «Downloads» → Order number 280937, 280938, 302267, 302287, 275512, 300583 を選択してください。

## 制御系アーキテクチャ

位置制御、アンチ・windアップ手法の加速度／回転数フィードフォワード機能付きの PID コントローラが DSP (digital signal processor) にインプリメントされています。サンプリング時間 ( $T_s$ ) は 1 ms です。この時間は一般的なドライブ・システムの機械的時定数に比べて十分小さな値です。構成を下図に示します。

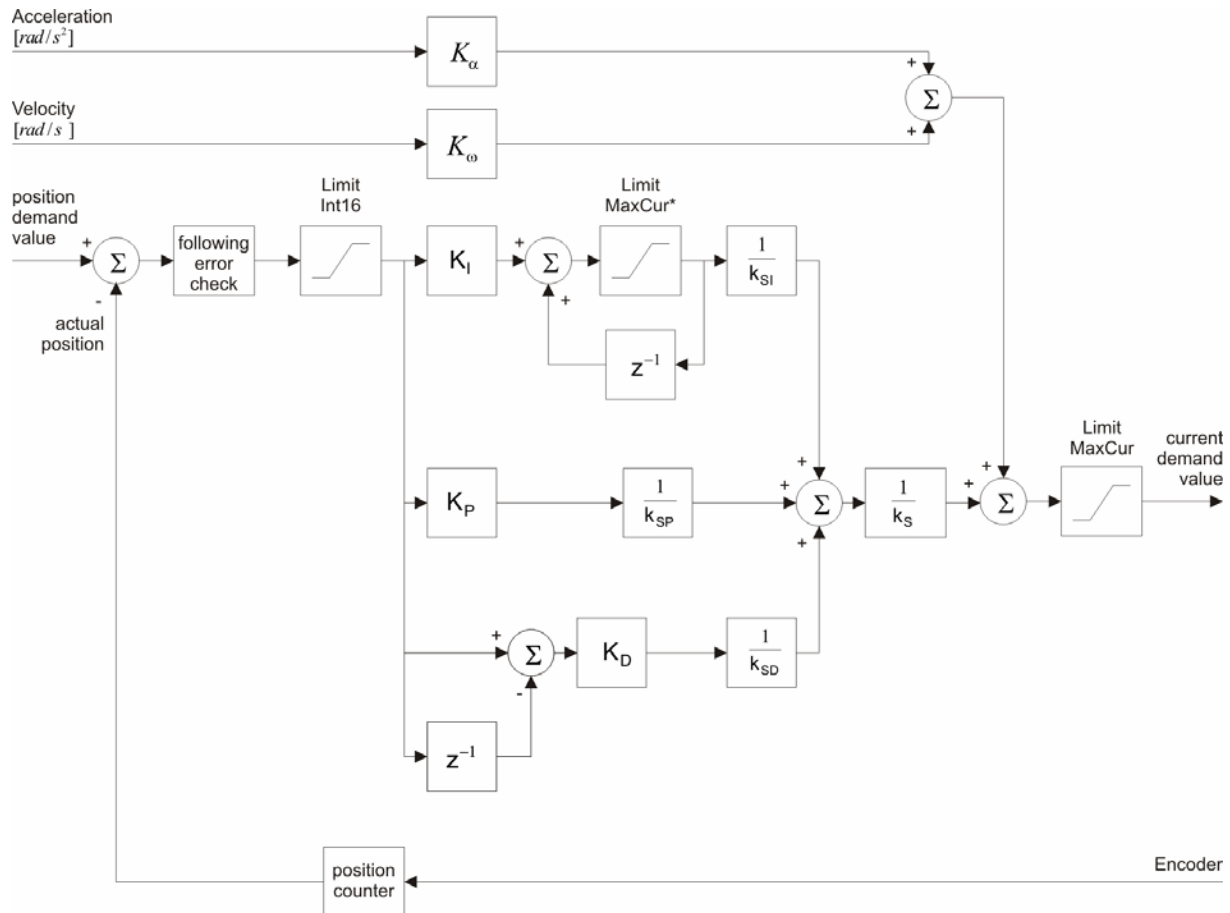


図1: 制御系アーキテクチャ

## 定数

Constant	EPOS 24/1	EPOS 24/5	EPOS 70/10
$k_{SP}$	$2^5 = 32$	$2^3 = 8$	$2^2 = 4$
$k_{SI}$	$2^8 = 256$	$2^6 = 64$	$2^5 = 32$
$k_{SD}$	$2^2 = 4$	$2^0 = 1$	$2^0 = 1$

エンコーダ分解能	$k_s$
0 - 200	$2^0 = 1$
201 - 1000	$2^1 = 2$
1001 - 5000	$2^2 = 4$
5001 - 7500	$2^3 = 8$

## オブジェクト・ディクショナリ・エントリー

記号	名称	Index	SubIndex
$K_p$	Position Regulator P-Gain	0x60FB	0x01
$K_i$	Position Regulator I-Gain	0x60FB	0x02
$K_D$	Position Regulator D-Gain	0x60FB	0x03
$K_\omega$	Velocity Feedforward Factor	0x60FB	0x04
$K_\alpha$	Acceleration Feedforward Factor	0x60FB	0x05

## 単位

加速度:	$\left[ \frac{rad}{s^2} \right]$	
回転数:	$\left[ \frac{rad}{s} \right]$	
位置:	$[qc] = \left[ \frac{1 \cdot (turn)}{Encoder\_pulse\_number \cdot 4} \right]$	(4 たい倍)
電流:	$[mA]$	
$K_p$ :	$\left[ \frac{mA}{k_{SP} \cdot k_S \cdot qc} \right]$	
$K_i$ :	$\left[ \frac{mA}{k_{SI} \cdot k_S \cdot qc \cdot T_S} \right]$	
$K_D$ :	$\left[ \frac{mA \cdot T_S}{k_{SD} \cdot k_S \cdot qc} \right]$	
$K_\alpha$ :	$\left[ \frac{A}{rad / s^2} \cdot 10^{-6} \right]$	(EPOS 24/5 および EPOS 70/10)
$K_\alpha$ :	$\left[ \frac{A}{rad / s^2} \cdot 10^{-7} \right]$	(EPOS 24/1)
$K_\omega$ :	$\left[ \frac{uA}{rad / s} \right]$	(EPOS 24/1, EPOS 24/5 および EPOS 70/10)

## 運転モード

加速度／回転数フィードバックは Profile Position Mode（プロファイル位置制御モード）および Homing Mode（原点出しモード）のみに効果があります。その他の全てのモード Position Mode、Profile Velocity Mode、Velocity Mode、Current Mode 等では無効です。

## 制御ゲイン・チューニング

制御ゲイン・チューニングは、ほとんどのドライブ・システムで複雑な過程です。EPOS GUI には "Regulation Tuning" と呼ばれるパワフルなウィザードが装備されています。この "Regulation Tuning" ウィザードを使用すれば、ほとんどのドライブ・システムで数分以内で適正な調整をすることができます。EPOS を調整するには次の手順に従ってください:

### Step 1: モータとシステム・パラメータの設定

EPOS GUI の "Startup Wizard" を実行してください。EPOS GUI 画面の左上にアイコンがあります。



Startup Wizard

図2: "Startup Wizard" アイコン

### Step 2: 電流ゲイン・チューニング

"Regulation Tuning" ウィザードを実行して、電流ゲイン (current regulator) 調整してください。ここで速度ゲイン (velocity regulator) および位置ゲイン (position regulator) の調整を行う必要はありません。



Regulation Tuning

図3: "Regulation Tuning" アイコン

### Step 3: 加速度フィード・フォワード成分の計算

加速度フィード・フォワード成分を次のように計算します:

$K_{\alpha} = \frac{J_{tot}}{k_m} \cdot 100$	[EPOS 24/5 および EPOS 70/10]
$K_{\alpha} = \frac{J_{tot}}{k_m} \cdot 1000$	[EPOS 24/1]

ここで  $J_{tot} [gcm^2]$  は総慣性モーメントです。負荷の慣性モーメント  $J_{load}$  が不明な場合は、暫定的にモータのロータ慣性モーメント  $J_{motor}$  の 2 倍として計算し、結果を見て再調整してください。ロータ慣性モーメントはモータデータ 17 行目 (DC モータ) または 15 行目 (ブラシレスモータ) に記載されています。  $k_m [mNm/A]$  はトルク定数でモータデータ 14 行目 (DC モータ) または 12 行目 (ブラシレスモータ) に記載されています。

### Step 3a: 加速度フィード・フォワード成分の書き込み

計算した値を書き込みます:

$K_{\alpha}$	Acceleration Feedforward Factor	0x60FB	0x05
--------------	---------------------------------	--------	------

### Step 4: 回転数フィード・フォワード成分の計算

摩擦を計算することが困難な場合は、推測値を設定してください。電流が回転数に比例するものとしてください:

$K_{\omega} \approx \frac{I \cdot 10}{n}$	$I = K_{\omega} \cdot n \cdot \frac{\pi}{30}$
---	---

回転数フィード・フォワード・ゲイン  $K_{\omega} [\mu A / rad / s]$  は、電流  $I [\mu A]$  に 10 を掛け回転数  $n [rpm]$  で割った値となります。

### Step 4a: 回転数フィード・フォワード成分の書き込み

計算した値を書き込みます:

$K_{\omega}$	Velocity Feedforward Factor	0x60FB	0x04
--------------	-----------------------------	--------	------

**Step 5: ゲイン・チューニング**

これでシステムは、ウィザードを利用した位置ゲイン (position regulation) 調整が可能な状態となりました。ゲッティング・スタートを参照して調整してください。

**実例**

この例では、ブラシレスの maxon motor EC40 を使用します:

**モータ (注文番号 118899)**

最大連続電流 (9 行目)	800 mA
トルク定数 (12 行目)	145 mNm/A
ロータ慣性モーメント (15 行目)	85 gcm <sup>2</sup>

**負荷**

負荷慣性モーメント	2960 gcm <sup>2</sup>
-----------	-----------------------

負荷は真鍮製ディスクで、慣性モーメントは 2960 gcm<sup>2</sup>です。モータと負荷の慣性モーメント比は 1 : 35 となり、制御するのは容易ではありません。

EPOS のデータ・レコーダを利用して次の測定を行いました。EPOS GUI でデータレコーダの設定と記録されたデータを見ることができます。データ・レコーダを開始するには GUI の "Record" タブを選択してください:

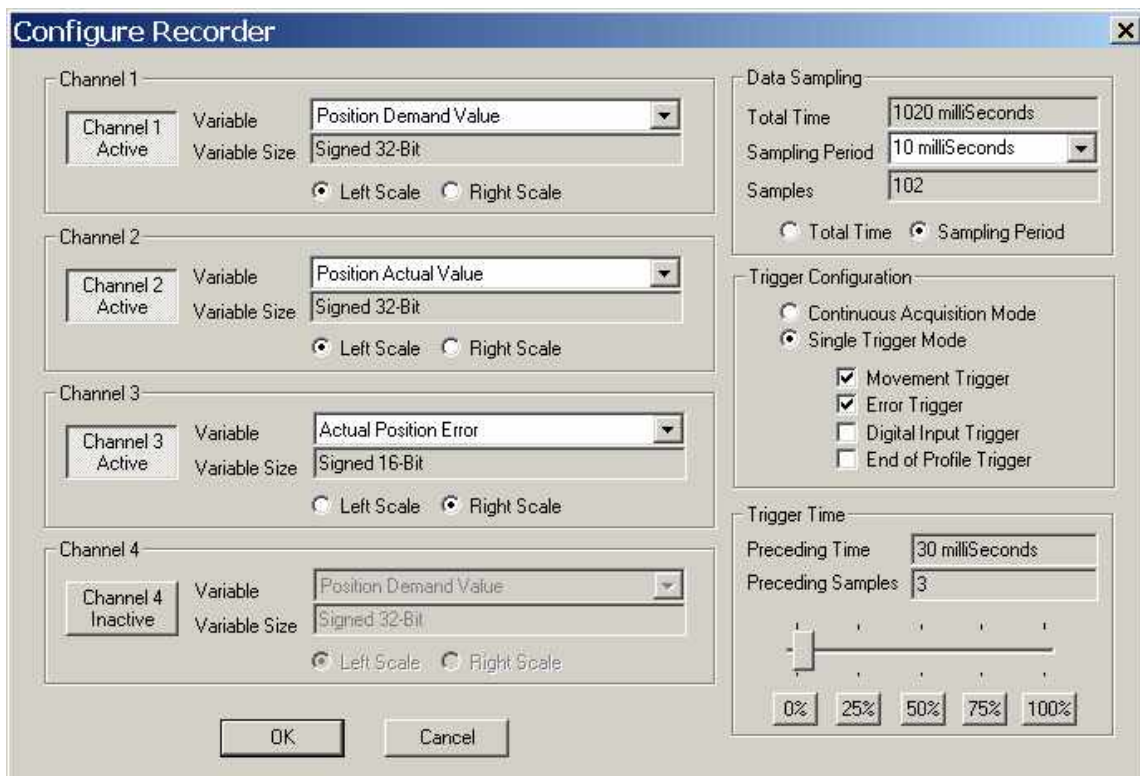


図4: データ・レコーダ設定

次のグラフはフィード・フォワード制御なしで、オート・チューニングした結果です:

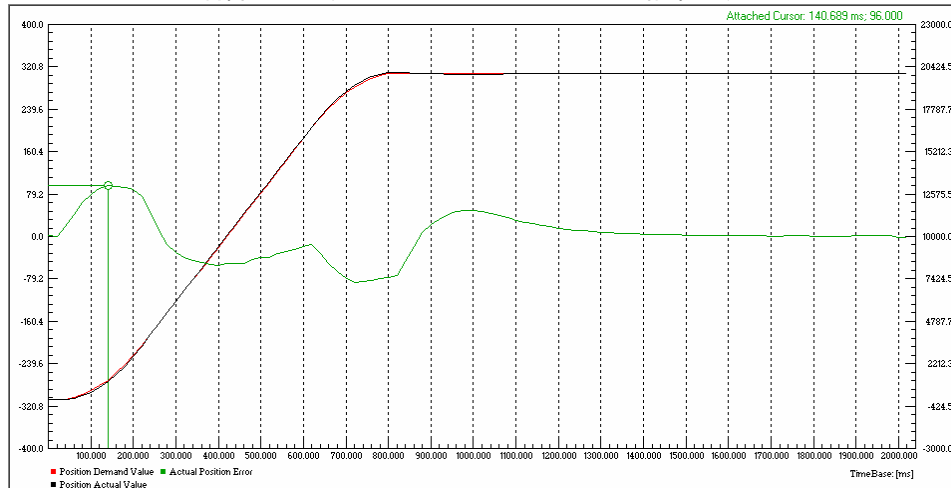


図5: フィード・フォワードなしの結果

Position Regulator P-Gain	1895
Position Regulator I-Gain	76
Position Regulator D-Gain	16500
Velocity Feedforward Factor	0
Acceleration Feedforward Factor	0
<b>最大位置誤差</b>	<b>96qc</b>

次のグラフは計算したフィード・フォワード・パラメータを入れて、オート・チューニングした結果です:

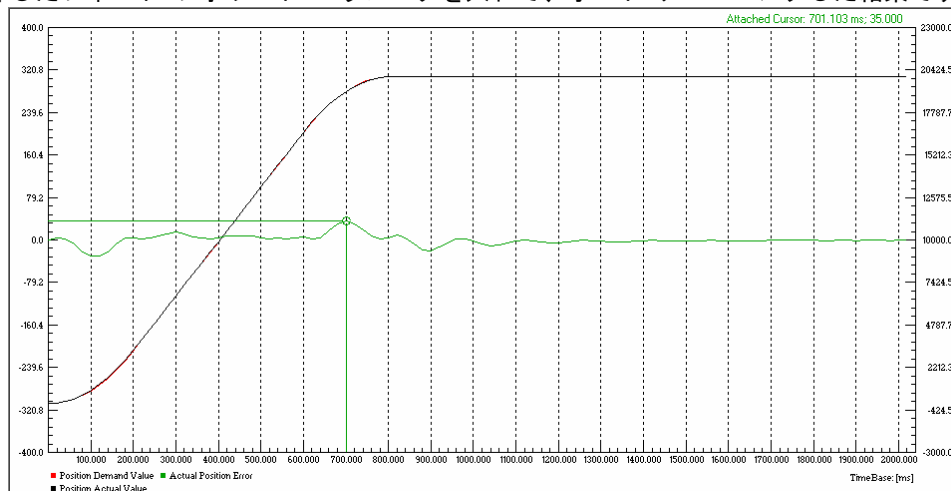


図6: フィード・フォワードなしの結果

Position Regulator P-Gain	1500
Position Regulator I-Gain	40
Position Regulator D-Gain	1505
Velocity Feedforward Factor	100
Acceleration Feedforward Factor	21021
<b>最大位置誤差</b>	<b>35 qc</b>

## 結論

ダイレクト・ドライブ・システムは低コスト化やバックラッシュ対策を目的として使用されます。このような場合、モータと負荷の慣性モーメント比はしばしば 1:10 以上となります。

EPOS は従来型の PID 制御を採用し、さらに **firmware version 2020h** 以降では加速度／回転数フィード・フォワードをインプリメントしています。この制御アーキテクチャによりモータと負荷の慣性モーメント比が大きい応用でも滑らかな制御が可能となりました。