

---

# ブラシレスDCモータ低コスト位置制御技術

## Low-Cost Position Control Technology of Brushless DC Motor

---

吉水 英毅\*  
Eiki YOSHIMIZU

鈴木 晴之\*\*  
Haruyuki SUZUKI

小池 孝尚\*\*\*  
Takahisa KOIKE

関 健雄\*\*\*  
Takeo SEKI

邑田 拓也\*  
Takuya MURATA

---

### 要 旨

---

HBステッピングモータをブラシレスDCモータに置き換える、低コスト位置制御技術を提案する。ステッピングモータは速度・位置制御が容易で、かつ安価である反面、エネルギー変換効率や重量、大きさでブラシレスDCモータに劣る課題があった。ブラシレスDCモータは省エネ・省資源という特性を有しながらも、位置決め性能が不足していた。これを付加するためには、センサと制御器に高額のコストが必要なため、OA機器をはじめ、高精度な位置決めを要求する汎用機器には使えなかった。この問題を、制御シミュレーション技術を使ったエンコーダ仕様の最適化と制御理論・信号処理技術の最適応用による低Bitデジタル制御器の開発で解決した。結果、ステッピングモータ置き換え可能な駆動精度が実機評価で確認でき、コストと機能が両立したことから、フルカラー複合機imagio MP C5002シリーズに搭載した。

### ABSTRACT

---

We propose the low-cost position control technology to replace HB stepping motors with brushless DC motors. Stepping motors are inexpensive and easy to control speed and position. However, Stepping motors are inferior in energy conversion efficiency, weight, size to brushless DC motors. Brushless DC motors are superior in energy and resource saving, but could not control position. In order to acquire this performance, high cost controller and high cost sensor are needed. Therefore, We have not used them for general-purpose equipments that require high-precision position control such as OA equipments. In order to cope with both accuracy and low-cost, we optimized the encoder specification and developed low-bit digital controller, using control theory, simulation and signal processing technology. Experimental results showed that control accuracy is satisfied, and we could replace HB stepping motors with brushless DC motors. The technology is adopted into The full color MFP 'imagio MP C5002 series'.

---

\* MFP事業本部 第二設計センター  
Second Design Center, MFP Business Group

\*\* 画像エンジン開発本部 ICT開発センター  
ICT Development Center, Imaging Engine Development Division

\*\*\* MFP事業本部 第三設計センター  
Third Design Center, MFP Business Group

---

## 1. はじめに

---

地球温暖化や資源枯渇への対策として、省エネ・省資源要求は大きく、リコー長期環境ビジョンにおいて2050年までに環境負荷削減目標として省エネ（2000年比）・省資源（2007年比）1/8が示されている。OA（オフィスオートメーション）機器の省エネ対策としては、紙にトナーを融かして定着させる定着ユニットでの省エネ技術「カラーQSU技術（DH定着方式）」<sup>1)</sup>や低融点トナー「カラーPxP-EQトナー」の開発、また待機時電力低減に早くから取り組み、大きな成果を上げている。しかし、モータの省エネについては取り組みが遅れていた。

OA機器で使われるモータは、大別して2種類ある。1つは、作像系で多く使われるパワーブラシレスモータ（以降、「BLDCM」と呼ぶ）と呼ばれるアウトロータ型ブラシレスDCモータで、FG（Frequency generator）信号を基にPLL（Phase Locked Loop）速度制御<sup>2)</sup>で使用する。もう1つは、給紙搬送系で使われる間欠駆動可能な位置・速度制御に適したステッピングモータ（以降、「STM」と呼ぶ）である。STMはBLDCMに比較してエネルギー変換効率が悪く、かつ重く大きい。したがって、STMの代わりにBLDCMを使うことができれば省エネ・省資源が実現できることになる。

しかし、ここで大きな問題がある。BLDCMは位置制御ができない。位置・速度制御をするためには、加減速追従性に優れたインナーロータ型DCM化とエンコーダのような位置検出センサ、そして制御IC、フィードバック制御ソフトウェアが必要になる。実現には、高額のコストアップが必至であった（以降、インナーロータ型ブラシレスDCモータを「DCM」と呼ぶ）。STM→DCM化による省エネ・省資源の実現のためには、安価なフィードバック制御技術とエンコーダの思い切った低コスト化が必要である。

弊社保有のエンコーダを使ったサーボモータ制御技術としては、インクジェットプリンタ作像エンジンでの副走査紙送り、キャリッジ往復駆動とカラー

コピー機の間転写ベルト搬送制御においては、PIDフィードバック制御<sup>3)</sup>の実績がある。しかし、これら制御は商品の高精度機能要求で使われた経緯から、高価なエンコーダや制御IC、高度なソフトウェアが用いられている。したがって、これら従来技術では、STM置き換え可能な制御精度と低コストを両立させることは困難であった。

本論文の目的は、低価格エンコーダと低Bit汎用マイコンを用いたデジタル制御技術<sup>4)</sup>を開発し、STM置き換え可能な位置・速度制御精度とコストを両立させることである。

当該技術は、2012年2月発売のフルカラー複合機 **imagio MP C5002** シリーズ機に搭載された。



Fig.1 imagio MP C5002.

---

## 2. ステッピングモータとDCモータ

---

本章では、弊社で使用頻度の高い3種類のモータの特徴と制御の違い、およびSTMとDCMの消費電力が違う理由を示す。

### 2-1 各モータ特徴比較

Table 1に、弊社でよく使われるモータの比較を示す。給紙搬送系でSTM、作像系でBLDCMが多く使われている。STMは速度・位置制御を伴った間欠駆動で使われ、エネルギー効率、重量、大きさでBLDCMに劣るが、位置・速度制御がセンサ無しで容易に行える特徴を有する。BLDCMは速度制御で

用いられ、慣性イナーシャが大きく間欠位置決め駆動には適さない。また、ブラシ付DCMは、インクジェットプリンタで多用されているがブラシ摩耗により、耐久性に難がある。このため、インナーロータタイプのブラシレスDCモータの開発を目的とした。

Table 1 Characteristics of stepping motors and DCmotors.

モータ種類	ステッピングモータ (ハイブリッド型)	ブラシレスDCモータ アウターロータタイプ	ブラシ付DCモータ
エネルギー効率(%)	30	70	50
重量	重い	軽い	軽い
大きさ	やや大きい	やや大きい	小さい
耐久性	◎	◎	△(ブラシ磨耗)
速度制御	◎(オープンループ制御、容易)	△(センサ・フィードバック制御が必要)	△(センサ・フィードバック制御が必)
位置制御	◎(オープンループ制御、容易)	×	△(センサ・フィードバック制御が必)
主な用途	OA、ATM、産業機器	広範囲	広範囲
リコー社内用途	給紙搬送系、ADF	作像系	インクジェット
本論文中の略記	STM	BLDCM	ブラシ付DCM

Fig.2に、HB型STM（ゴムダンパー付）を示す。OA用途では、モータ自身の発生する振動が取り付け板から反射して起こる脱調やトルクダウンを防止し、安定した出力トルクを確保するため、モータと取り付け板の間に防振ゴムダンパーを装着して使用するのが一般的である。しかし、このことがコストアップの要因にもなっている。ブラシレスDCモータでは、ホール素子信号を基にしたモータドライバによる相励磁切り替えが自動で行われるため、モータ自身の発生振動は極めて小さくゴムダンパーは不要である。



Fig.2 HB stepping motor.

Fig.3に、アウターロータタイプのブラシレスDCモータ（BLDCM）を示す。モータ基板上に速度制

御で使うFGコイルが形成され、さらにPLL制御用モータドライバが搭載されている。



Fig.3 Outer rotor DC brushless motor.

## 2-2 オープンループ制御とフィードバック制御

Fig.4に、オープンループ制御を示す。ステッピングモータは、モータドライバにパルスを入力すれば、そのパルス数に応じて移動量が決まり、単位時間あたりのパルス数を変化させることで回転速度を制御できる。許容負荷トルク内では速度・位置制御ができるが、許容限度を超える負荷トルクがあると、脱調という現象が生じ駆動できなくなる。



Fig.4 Open-loop control system.

Fig.5に、フィードバック制御を示す。DCモータは、負荷トルクが変わると回転数も変わる特性（T-Nカーブ特性）があるため、速度・位置制御のためには位置検出センサとフィードバック制御による電圧調整が必要になる。今回開発したDCMには光学式エンコーダセンサを使用し、制御はマイコンを使用、制御アルゴリズムは位置比例制御+速度PID制御を基本とする方式を採用した。位置指令、センサ、モータ入出力信号はデジタル信号処理している。モータへの電圧調整はPWM駆動方式を採用している。

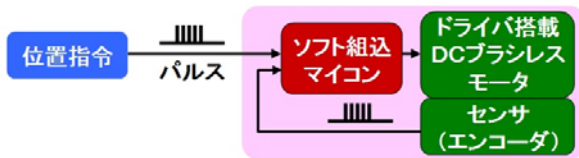


Fig.5 Feedback control system.

### 2-3 STMとDCM消費電力の違い

Fig.6を用いて、STMとDCMでの消費電力の違いについて説明する。図は、ADF (Auto Document Feeder) で厚紙3枚をセットして通紙したときの消費電力概略図である。STMはオープンループ制御で定電流駆動し、DCMはフィードバック制御をしている。STMの設定電流値は、脱調に注意し、最大メカ負荷トルクに対してさらに安全率を掛けた値を、モータ出力トルクとして算出する。メカ負荷トルクは給紙搬送系駆動では、紙厚や搬送パスでの屈曲変形トルク、環境、経時変化で大きく変化するため、最大メカ負荷トルクと標準条件 (普通紙、常温常湿) トルクとの差は非常に大きい。DCMは、若干の損失はあるがトルクに応じた消費電流で駆動 (T-I特性) されるため、STMに比較して少ない電力でモータを駆動できる。停止・Hold時は、Holdトルクの算出が困難で大きなマージンを結果的に持っているため、その差がさらに顕著である。

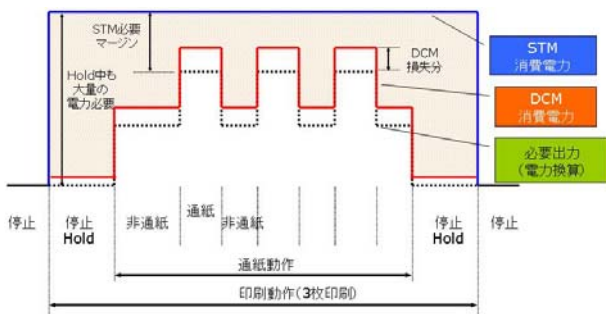


Fig.6 Comparison of power consumption of STM and DCM.

## 3. 低コスト化技術開発

本章では、低コスト化を実現した技術、特に低価格エンコーダと低Bit汎用マイコンを用いたデジタルフィードバック制御技術開発について述べる。開発手法として、MBD (Model Based Development) を用いた。開発工数・開発期間の削減に大いに寄与する。当初搭載予定の機種に対し、1年前倒しで開発完了ができた。シミュレーションソフトは、MATLAB/Simulink (The MathWorks社製) を使用した。

### 3-1 モータ構成

低コスト化と使いやすさを重視し、モータ構成に関し従来とは異なる構成を採用した。従来エンコーダでのモータ制御は、駆動対象近傍にエンコーダを配置しフィードバック制御を行うのが常である。これは当然のことで、最終アウトプットでの高精度化がそもそもエンコーダの使用目的であるからである。しかし、今回は駆動対象がSTM駆動同等の制御精度達成を目標にすることと割り切り、あえてエンコーダはモータ軸に設置した。

この構成採用により、制御設計が大幅に簡素化し、工数削減に大きく寄与し、しかも安定した制御が可能となった。また、3-4節に詳述するが、モータ軸エンコーダ出力は高周波となるため、モータスリット数が少なく精度が悪くても制御性能への影響を低減することが期待でき、低コストエンコーダが使用可能となった。

### 3-2 MILS(Model In the Loop Simulation)

MILSとは、モデル (Model) を使ったシミュレーション (MBD) の開発初期のプロセスである。モデルの高精度化と制御アルゴリズム検討やデジタル処理の検討、さらにシミュレーション評価を行う開発で最も重要なステージである。

Fig.7に、DCMフィードバック制御構成をモデル化した概念図 (ブロック図) を示す。主要モデルは指令値、制御部、モータドライバ、モータ+メカ、

エンコーダである。また、デジタル制御のために、サンプリング（時間的離散化）と量子化（数値的離散化）もモデル化している。モータモデルについては、実験検証を繰り返し高精度化した。また、制御部モデルは、制御アルゴリズムとデジタル処理など今回の新規技術が反映されたモデルとなっている。

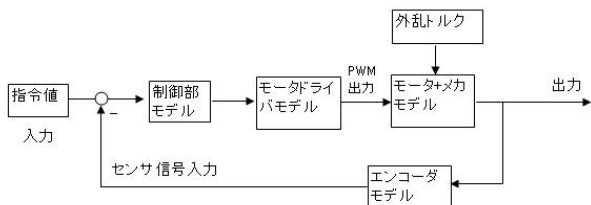


Fig.7 DCmotor feedback control model.

Fig.8に、MILSでの評価結果事例を示す。表示項目は上から、位置（Position）、位置偏差（Position Error）、速度（Velocity）（目標速度と現在速度）、電流値（Current）、電圧（Voltage）、エンコーダ（Enc）信号（A、B相）である。加速時と減速時に、目標位置に対する位置偏差が発生していることが分かる（遅れ偏差がプラスで表示）。電流値はトルクを表す（T-I特性）ため、加速中トルクは等速時負荷トルクより大きい様子が分かる。電圧は逆起電圧（発電分相当）とメカ負荷起因消費電圧の合計を表している。このように、MILSを行うことでアイデア検証の評価結果が入出力データから一目で分かる便利さがある。

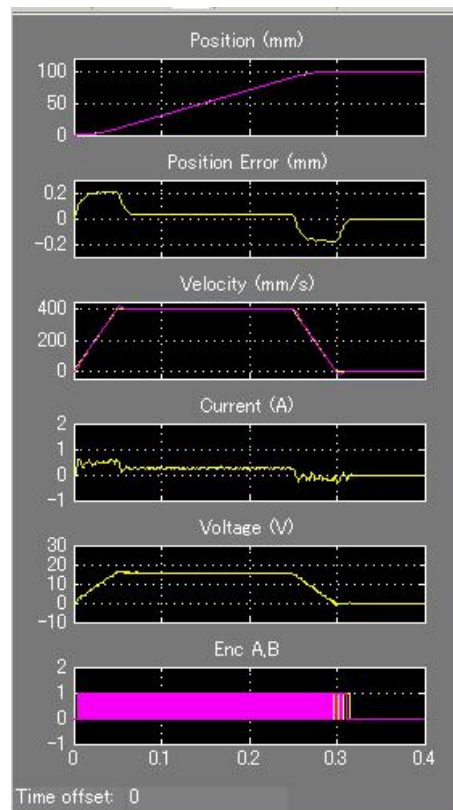


Fig.8 An example of the output of MILS results.

### 3-3 低コストデジタル制御器の開発

従来技術ではFig.9に見られるような多bitの高機能リソースを必要とするため、Hi-endマイコンになり、冗長で高コストになっている。

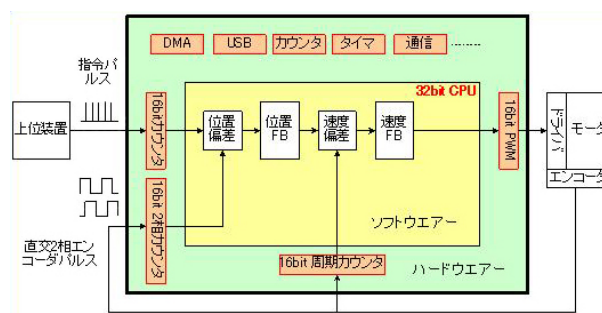


Fig.9 Hi-end multi-bit high-performance microcontroller.

Fig.10に、今回開発したデジタル制御器を示す。信号処理と制御理論の適切な応用で、ハードウェア

リソースの最小化により、Low-endマイコンを利用可能にした。具体的な実施内容は以下4つである。

- (1) エンコーダ2相カウンタ：ソフト化で高機能ハードカウンタを不要とした。
- (2) 位置FF (feed forward) による指令パルスカウンタの低bit化
- (3) ノイズシェーバによるPWM出力の低bit化
- (4) マルチレート分散処理により低bit汎用CPUの制御周期内で実行可能とした。

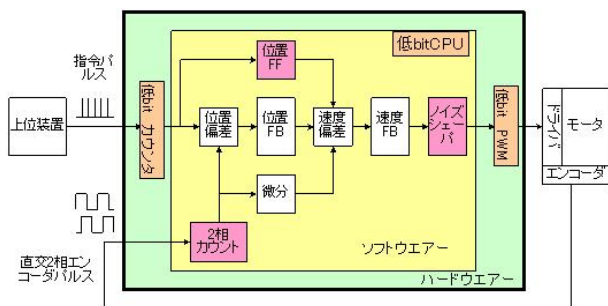


Fig.10 Low-end little bit microcomputer.

### 3-4 低コストエンコーダの選定

従来使用しているエンコーダは、PETフィルムに露光してパターンを形成していた。この方式では、十分な分解能とスリット寸法精度の確保が容易であった。ただし、軸に固定するときHUBと結合部材が必要で、部品点数が増えコストアップ要因であった。今回採用したCupDiskエンコーダ<sup>5,6)</sup>は、モールド成形品でスリット部分とHUBが一体になった製品である。組立性も1Processと非常に良い。ただし、成形品のためスリット幅やスリット精度に制約があり、従来制御方式は使うのが困難と考えられてきた。

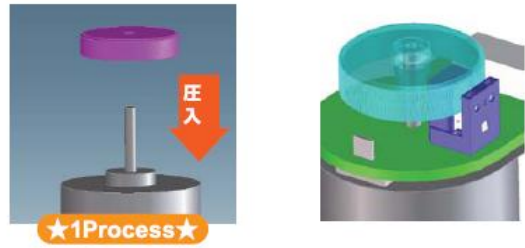


Fig.11 Cup-Disk encoder.<sup>5)</sup>

このため、制御シミュレーションを用いて、最少必要パルス数と部品寸法精度の妥当性を判断した。

Fig.12に、ホールド制御中にトルク外乱 (0.01Nm, 10Hz正弦波) を受けた場合の、電流・速度・位置制御誤差に及ぼすエンコーダパルス数 (分解能) の影響を示す。この結果から、400パルス/周までは、分解能を下げても各値は安定していることが分かる。

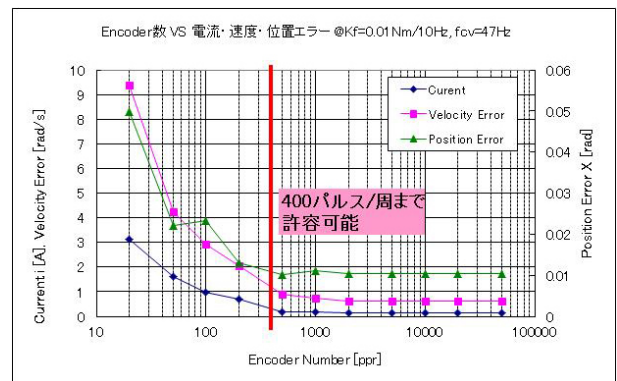


Fig.12 Simulation results of the encoder resolution.

Fig.13に、モータ回転数を変えた場合の速度許容誤差 (%) を示す。横軸は、線速変動周波数 $f$ をモータ回転周波数 $fr$ で割った値 ( $f/fr$ 比) である。 $f/fr$ が10以上の高周波は、主にエンコーダ精度が主因 (センサ外乱) で、この領域は制御帯域を適切に設計することで実際の回転変動にはならないため、大きな誤差が許容できる。カップディスクスリット数は100なので $f/fr=100$ であり、このときの値が約50%である。加工精度はこの値より十分小さいため使用可能と判断できた。

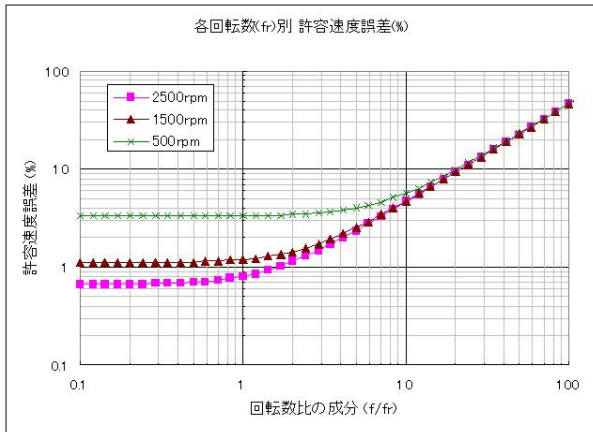


Fig.13 Tolerance of speed rate at each rotation speed.

以上の結果より、スリット数は100スリット/周、エンコーダ分解能は400パルス（4通倍）とする。2相HBステッピングモータの基本ステップ角が $1.8^\circ$ のため、1-2相励磁駆動の分解能と同じである。

## 4. 実験評価システム

実験評価は、MILS（3-2節で説明）と実機試作評価のRP（Rapid Prototype）で行った。

### 4-1 RP(Rapid Prototype)

RPは試作機での評価である。MILS評価結果検証の意味合いが強い。モデル精度が高ければMILSとRPの結果は一致する。

Fig.14に、RP実験機の構成を示す。実験評価システムには、日本ナショナルインスツルメンツ株式会社製LabVIEWを用いた。パルス指令値生成および出力、エンコーダセンサ信号処理、解析、表示を行わせている。制御マイコン、モータドライバ、モータ、駆動対象に実物を使用している。制御プログラムは制御マイコンに書き込んである。また、エンコーダは制御用エンコーダ以外に、計測用としてハイデンハイン社製高分解能タイプを使用している。

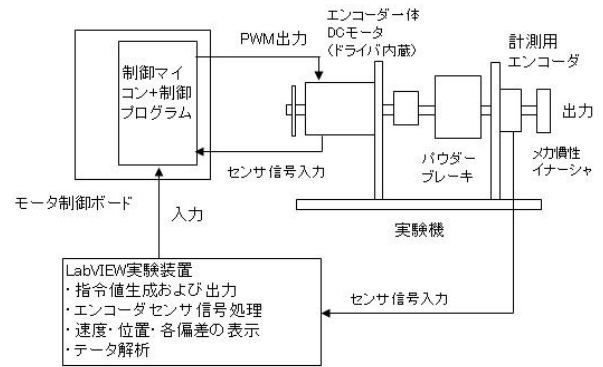


Fig.14 Rapid prototype configuration diagram.

Fig.15に、実機評価に使ったフルカラー複合機MFP imagio MP C5001改造機を示す。給紙モータはHB型STM（ $\square 56 \times L42$ ）の代わりに20W品DCM、レジストモータはHB型STM（ $\square 42 \times L40$ ）の代わりに10W品DCMに組み換え評価を行った。



Fig.15 Machine used for the evaluation.

Fig.16は、結果表示の事例である。レジストモータ（赤線）と給紙モータ（白線）の位置偏差（上段図）と速度（目標速度と現在速度）（下段図）、電磁クラッチON-OFF（下段）を表した駆動シーケンスの一部である。動作としては、給紙モータが駆動し等速になった直後に電磁クラッチONで、給紙カ

セットに積載された紙から1枚を分離搬送し、レジストローラに突き当て停止、クラッチもOFFとする。その後、レジストモータと給紙モータを同時に立ち上げて紙搬送をしている図である。給紙モータ（白線）では、クラッチON-OFFでメカ負荷が変動し、一瞬速度も変動している様子が分かる。

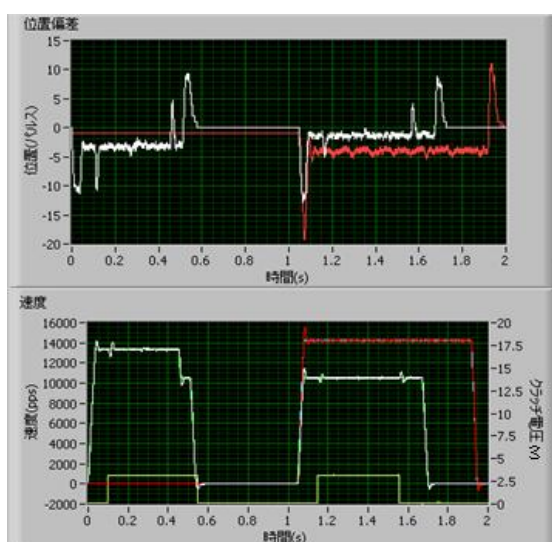


Fig.16 An example of RP results.

## 5. 結果

Fig.17に、モータメーカーと共同で開発した新型DCMを示す。モータ基板上に、光学式エンコーダとモータドライバが搭載されている。メカ、エレキ仕様は標準化を考慮し集約化を進めた。エンコーダへのゴミ対策のため、カバーで覆う構成にしている。



Fig.17 New developed DC motor.

### 5-1 制御性能評価結果

モータ駆動の設計要求精度は、レジスト搬送、給紙搬送ごとに設計部門より提示された。レジスト搬送で6項目、給紙搬送で7項目あり、各測定対象、測定項目と規格値が決められている。

Table 2 Evaluation results of a resist motor.

	測定対象	測定項目	規格値	Sim結果 (MILS)	実測結果 (RP)
加速	加速して整定するまでの移動距離	定常位置誤差が許容値になる距離	30 [mm]	2.4 [mm]	6.4 [mm]
加速	立ち上げ時位置誤差(オーバーシュートを含)	立上り位置誤差	±500 [μm]	200 [μm]	277.2 [μm]
定常	モータ速度安定性	定常位置誤差	±50 [μm]	-	38 [μm]
定常	記録紙二次転写突入ショックによる位置誤差	変動位置誤差	±500 [μm]	-	38 [μm]
減速	減速時間	定常位置誤差が許容値になる時間	20 [ms]	13 [ms]	7 [ms]
停止	停止時の位置誤差	停止位置誤差	±50 [μm]	0 [μm]	0 [μm]

Table 3 Evaluation results of a paper feed motor.

	測定対象	測定項目	規格値	Sim結果 (MILS)	実測結果 (RP)
加速	加速して整定するまでの移動距離	定常位置誤差が許容値になる距離	30 [mm]	6.9 [mm]	11.1 [mm]
加速	立ち上げ時位置誤差(オーバーシュートを含)	立上り位置誤差	±500 [μm]	253 [μm]	284 [μm]
定常	モータ速度安定性(レジスト同期搬送時)	定常位置誤差	±50 [μm]	-	25.2 [μm]
定常	モータ速度安定性(レジストセンサ検知時)	定常位置誤差	±50 [μm]	-	28.7 [μm]
停止	停止時の位置誤差	停止位置誤差	±50 [μm]	0 [μm]	0 [μm]
負荷変動	クラッチON時の位置誤差	ショックON位置誤差	±500 [μm]	252 [μm]	232 [μm]
負荷変動	クラッチOFF時の位置誤差	ショックOFF位置誤差	±500 [μm]	93.3 [μm]	94.6 [μm]

Table 2, 3の実測結果から、従来STMで達成していた規格値を今回開発したDCM制御システムで全項目達成できた。シミュレーション結果との差異も少なく、モデルの完成度も高い結果を得た。

### 5-2 省エネ・省資源の効果比較

実機評価で、STMのDCM化による消費電力削減効果と重量の削減効果を調べた。モータ1は給紙搬送モータHB型STM (□56×L42)、モータ2はレジストモータHB型STM (□42×L40) である。DCMは、20W品と10W品へそれぞれ置き換えた。消費電力量比較では、省エネ基準であるTEC値 (Typical Electricity Consumption) を用いた。



Fig.18から分かるように、DCM化により52%削減ができ、開発目標25%の2倍以上の効果を得た。

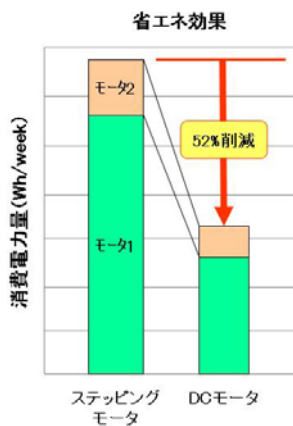


Fig.18 Energy saving effect.

Fig.19に示されるように、重量も58%減を達成し、開発目標の30%を大きく越える効果を得た。

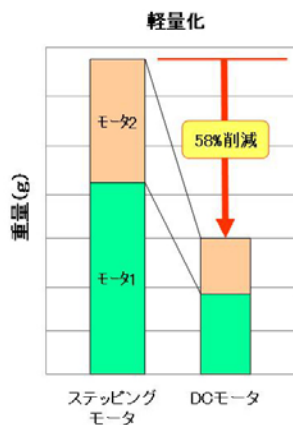


Fig.19 Resource saving effect.

### 5-3 コスト低減効果

エンコーダコストは従来比約1/3、マイコン費用も当初想定約1/3となり、全体として開発初期の見積もりから約40%の部品費低減ができた。

## 6. まとめ

低価格エンコーダと低Bit汎用マイコンを用いたデジタル制御技術を開発し、STM置き換え可能な位置制御精度とコストを両立させたブラシレスDCモータ位置制御技術を開発した。

本技術は2012年2月発売のフルカラー複合機

今後は多軸制御IC開発によるさらなるコストダウンを行い、DCM化による省エネ・省資源を加速する。

### 参考文献

- 1) 石井賢治ほか: カラーQSU技術 (DH定着方式), *Ricoh Technical Report*, No.38, pp.44-49, (2012).
- 2) 谷腰欣司: DCモータ活用の実践ノウハウ, 第2版, pp.85-92, CQ出版社 (2001).
- 3) 山本重彦, 加藤尚武: PID制御の基礎と応用[第2版], 朝倉書店 (2005).
- 4) 中野道雄監修, 松尾芳樹著: デジタル制御[初版], 株式会社昭晃堂 (2001).
- 5) コーデンシ株式会社: 新製品 DCモーター用CupDisk+エンコーダ, <http://www.kodenshi.co.jp/news/docs/CupDisk%2BEncoder.pdf> (参照2013-09-26).
- 6) コーデンシ株式会社, 株式会社小松ライト製作所: 光透過型エンコーダ用スケール及びその成形金型, 特開 2012-255733(P2012-255733A) (2012).