

転写ベルトの厚み変動に対応した高精度駆動制御技術

High Precision Drive Control Method Compensating the Influence of Transfer Belt Thickness Variation

松田 裕道* 安藤 俊幸* 小出 博**
Hiromichi MATSUDA Toshiyuki ANDOH Hiroshi KOIDE

要 旨

近年、電子写真カラープリンターでは、転写ベルトの速度変動が色ずれの原因となるため、高い定速性が要求されている。転写ベルトの定速性を実現する駆動制御技術として、転写ベルトに接触する従動ローラの回転軸にロータリーエンコーダを設け、検出した回転速度をフィードバック制御する技術がある。しかし、転写ベルトの周方向にわたる膜厚偏差分布、いわゆるベルト厚み変動に起因して制御誤差が生じるため、高精度な定速制御が困難であった。そこで、ロータリーエンコーダと駆動モータの回転情報を基に、事前にベルト厚み変動による制御誤差を高精度に認識し、誤差を補正しながら制御することが可能な新規制御技術を開発した。これによって、極めて高いベルト定速性能を実現した。また、出力画像を解析したところ、ベルトの厚み変動に起因する色ずれが大幅に改善したことを確認した。

ABSTRACT

A new belt drive control method for reducing a belt velocity-fluctuation is proposed. The velocity-fluctuation of a transfer belt in electrophotographic-color-printer causes color-registration-error and it degrades image quality. In order to obtain high image quality, driving technology to keep the belt velocity constant is needed. A feedback control approach, which regulates an angular velocity of a driven roller, has control error caused by a belt thickness-variation. The belt thickness-variation is a distribution of belt thickness in the circumferential direction. The new belt control method adopts the feedback control and compensates the control error. The feasibility and effectiveness of the new belt control method is experimentally verified.

* 画像エンジン開発本部 モジュール開発センター
Module Development Center, Imaging Engine Development Division
** エタニ電機株式会社
Etani Electronics Co., Ltd.

1. 背景と目的

近年、電子写真カラープリンターの高速、高画質化に伴い、転写ベルト（以下、ベルト）駆動技術の重要性が高まっている。^{1), 2)}高速性に優れた4連タンデム型プリンターの多くはベルトを利用した転写方式を採用しており、ベルトの移動速度は画像品質に大きな影響を与える。このため、ベルト駆動技術には高精度な定速性能が要求されている。

4連タンデム型では、ベルト移動速度が変動すると、カラー画像の位置精度が大きく低下する。Fig.1は、4連タンデム型直接転写方式の概要図である。転写ベルトユニットは、転写ベルト、駆動ローラ、テンションローラ、従動ローラから構成されている。用紙は、転写ベルト上に静電吸着されながら、各色の感光体ドラムへ搬送され、4色の画像が順次、用紙上に重ねて転写される。用紙搬送中に転写ベルトの速度が変動すると、カラー画像の重ね位置誤差が発生する（以下「色ずれ」という）。³⁾

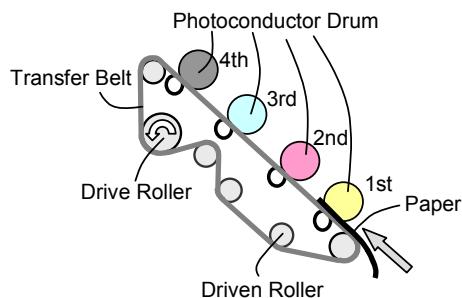


Fig.1 The schematic view of the belt transfer unit.

ベルト速度変動は、モータ回転誤差や駆動伝達部品の形状誤差や組付誤差のほか、ベルト厚み変動によって発生する。ベルト厚み変動とは、Fig.2に示すようなベルト一周にわたる不均一な厚み分布のことである。ベルトは繋ぎ目のないエンドレスベルトで、その成形方法により、ベルト厚みの均一性が得られにくい。

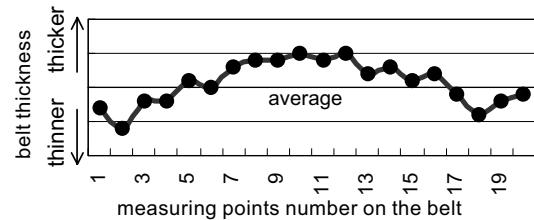


Fig.2 Measured belt thickness.

このようなベルトでは、駆動ローラが一定角速度で回転しても、ベルト厚みの変動によりベルト速度変動が発生する。Fig.3は、ベルトが駆動ローラに巻き付いている様子を示す。単層構造のベルトの場合、破線で示すように、ベルトの移動速度を決定するベルトピッチ線はベルト膜厚の中央部となる。駆動ローラが一定角速度で回転している場合、ローラ上にベルトの平均厚みより厚い部分（Fig.2の計測ポイント5から16まで）が巻き付いている時には、ローラの回転中心からベルトピッチ線までの距離が長くなるため、ベルトの移動速度が平均よりも速くなる。反対に、ベルトの薄い部分が巻き付いている場合には、回転中心からベルトピッチ線までの距離が短くなり、ベルトの移動速度が遅くなる。このように、ベルト厚み変動によりベルト速度変動が生じ、その変動周期はベルト周回と一致する。

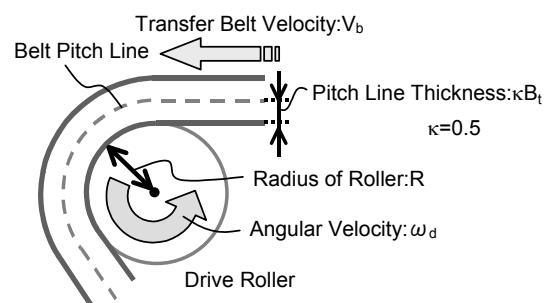


Fig.3 The belt driving model (a single layer belt).

この課題に対し、ベルト一周にわたる厚み変動を測定して、駆動モータの回転速度を調整する方法があるが、ベルト速度を高精度に一定とするには困難がある。ベルト厚み変動はベルト周方向だけでなく幅方向にもあり、ベルト幅方向において1点のみのベルト厚み計測値では、発生するベルト速度変動を予測して補正す

ることは難しい。

ベルト厚み変動によるベルト速度変動は、従動ローラの回転角速度をフィードバックして制御する場合にも発生する。Fig.4に示すフィードバック制御系は、従動ローラにロータリーエンコーダを設置し、検出した回転角速度を目標値と比較し、従動ローラが目標角速度で一定となるように制御する。これによって、モータ回転誤差や駆動伝達部品誤差によるベルト速度変動は抑制される。しかし、従動ローラの回転角速度を一定に制御しても、ベルト厚み変動によりFig.3に示した駆動ローラと同様の現象で、ベルト速度変動が生じてしまう。言い換えると、従動ローラでベルト速度を検出すると、ベルト厚み変動により、検出誤差が発生してしまう。

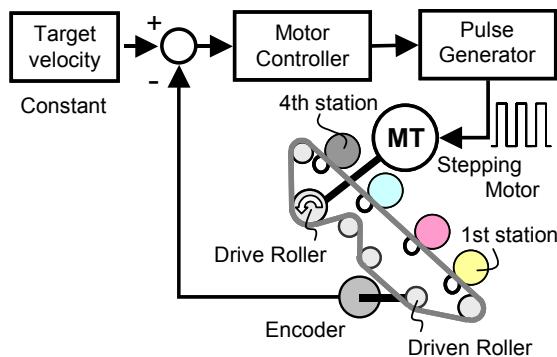


Fig.4 The feedback control system.

目的は、このようなフィードバック制御系において、ベルト厚み変動によるベルト速度検出誤差を補正し、より高精度なベルト定速性能を実現することである。

2. 技術

本報告では、開発した新規駆動技術について、以下の順で説明する。まず、ベルトに厚み変動があるときの駆動ローラと従動ローラの回転角速度の関係を定式化する。次に、従動ローラの角速度変動から、従動ローラでのベルト厚み変動によるベルト速度検出誤差を解析する。速度検出誤差の補正值を算出するアルゴリズムと、その補正值を反映したフィードバック制御系を提案し、最後に、本制御系を搭載した画像形成装

置において、高精度なベルト定速性能と高画質化を実現したことを報告する。

2-1 ベルト厚み変動と駆動ローラ及び従動ローラの回転角速度の関係

エンドレスベルトの厚み変動は、Fig.2のように1個の厚みピークを持つものが多く、ベルト厚みは1次の正弦関数に近似できる。

$$B_t = B_0 + B_v \sin(\theta_b + \alpha) \quad \cdots(1)$$

ただし、 B_0 はベルト平均厚み、 B_v は厚み変動振幅、 θ_b はベルト位相、 α は変動の初期位相である。ちなみに、複数の厚みピークを持つ変動の場合は、(1)式に高次の正弦関数項を追加する。(1)式のベルト厚み変動がある場合の駆動ローラの角速度 ω_d とベルト速度 V_b の関係は(2)式となる。

$$V_b = (R_d + \kappa B_0 + \kappa B_v \sin(\theta_b + \alpha)) \omega_d \quad \cdots(2)$$

ただし、Fig.3に示したように R_d は駆動ローラ半径、 κ はベルトピッチ線係数である。 κ は、ベルトピッチ線の膜厚方向の位置を示し、単層ベルトの場合、概ね0.5である。

(2)式で算出されるベルト速度変動を基に、ベルト厚み変動が大きな色ずれ要因であることを説明する。Fig.5は、Table 1に示す一般的なベルトユニット構成を想定し、駆動ローラ角速度が一定としたときにベルト厚み変動によって発生するベルト速度変動率を示している。

Fig.5より、ベルト厚み変動幅 $10 \mu\text{m}$ による速度変動率は0.03%程度と微少であるが、変動が長周期のために大きな色ずれが発生する。例えば、第1ステーションで図中aのタイミングに画像を形成し、その後、第4ステーションでbのタイミングに画像を重ねた場合、この間、常にベルト速度は速い状態であったため、約 $50 \mu\text{m}$ の色ずれが発生する。現在、電子写真プリンターの色ずれの許容値は $100 \mu\text{m}$ と言われており、1つの変動要因で $50 \mu\text{m}$ の色ずれが生じると十分な画像品質を達成できない。

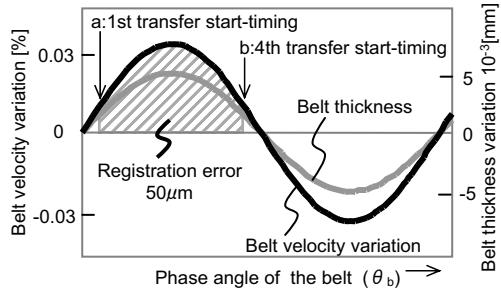


Fig.5 Relation of belt thickness on the drive roller and the belt velocity variation.

Table 1 Specification of the belt unit.

駆動ローラ直径	30 mm
従動ローラ直径	16 mm
ベルト平均厚み	0.1 mm
ベルト厚み変動幅 (PtoP)	10 μm
ベルト周長	1000 mm
第1と第4ステーション間距離	400 mm

(2)式と同様に、従動ローラの角速度 ω_e とベルト搬送速度 V_b の関係は以下のようになる。

$$V_b = (R_e + \kappa B_0 + \kappa B_v \sin(\theta_b + \alpha + \tau)) \omega_e \quad \cdots(3)$$

ただし、 R_e は従動ローラ半径である。 τ は駆動ローラと従動ローラ間の距離に伴うベルト厚み変動周期の位相差である。ここで、ベルト速度が一定のときにベルト厚み変動によって発生する従動ローラの回転角速度変動をFig.6に示す。ベルト膜厚が大きくなるに従い、従動ローラの回転角速度は減少する。ベルトユニットの従動ローラ径は、駆動ローラ径に対して小さいため、従動ローラ角速度の変動率は大きくなり 0.06%程度となる。

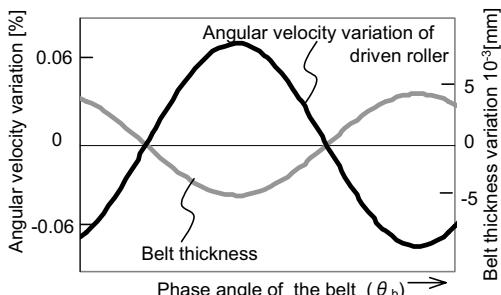


Fig.6 Relation between the belt thickness on the driven roller and velocity variation of the driven roller.

ベルト搬送方向の伸縮やベルトとローラ間のすべりは無いと仮定すると、駆動ローラ部と従動ローラ部のベルト速度は一致する。したがって、(2)式と(3)式は、(4)式のようにまとめることができる。

$$\begin{aligned} \omega_e &= \frac{R_d + \kappa B_0 + \kappa B_v \sin(\theta_b + \alpha)}{R_e + \kappa B_0 + \kappa B_v \sin(\theta_b + \alpha + \tau)} \omega_d \\ &= \frac{(R_d + \kappa B_0) \left(1 + \frac{\kappa B_v}{R_d + \kappa B_0} \sin(\theta_b + \alpha) \right)}{(R_e + \kappa B_0) \left(1 + \frac{\kappa B_v}{R_e + \kappa B_0} \sin(\theta_b + \alpha + \tau) \right)} \omega_d \end{aligned} \quad \cdots(4)$$

ここで、ベルト厚み変動の振幅はローラ径に比べて小さいため、 $\varepsilon_e = \kappa B_v / (R_e + \kappa B_0) \ll 1$ である。したがって、 $1/(1 + \varepsilon_e) \approx 1 - \varepsilon_e$ 、 $\varepsilon_e^2 \approx 0$ とすると(4)式は(5)式となる。

$$\begin{aligned} \omega_e &= \\ \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_d} (1 + \varepsilon_d \sin(\theta_b + \alpha) - \varepsilon_e \sin(\theta_b + \alpha + \tau)) \omega_d & \end{aligned} \quad \cdots(5)$$

(5)式のように、駆動ローラと従動ローラの回転角速度の関係を導くことができた。

2-2 従動ローラでのベルト速度検出誤差の解析

(5)式の2つの正弦関数項は、それぞれ、駆動ローラで発生するベルト速度変動(A)と、従動ローラでのベルト速度検出誤差(B)を示している。駆動ローラの角速度 ω_d が一定のとき、従動ローラの角速度 ω_e からは、(A)と(B)の2つの変動が重畠した結果の変動が検出される。(5)式の2つの正弦関数を合成して、従動ローラでの検出結果の変動(C)を表すと(6)式となる。

$$\omega_e = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_d} (1 + K \sin(\theta_b + \alpha + \beta)) \omega_d \quad \cdots(6)$$

ただし、

$$K = \sqrt{\varepsilon_d^2 + \varepsilon_e^2 - 2\varepsilon_d \varepsilon_e \cos(\tau)} \quad \cdots(7)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{-\varepsilon_e \sin(\tau)}{\varepsilon_d - \varepsilon_e \cos(\tau)}$$

(A), (B), (C)の3つの変動成分の関係をFig.7に示す。ただし、 $G = \omega_d \varepsilon_e / \varepsilon_d$ とした。本解析により、駆動ローラが一定角速度時の従動ローラの回転角速度変動(C)から、ベルト速度変動(A)やベルト速度検出誤差(B)を推定することが可能となった。

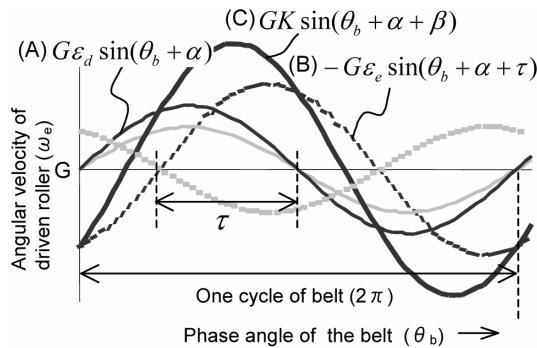


Fig.7 Relation of variation terms in Eq.(5)and(6).

2-3 補正値算出アルゴリズム

Fig.4に示したフィードバック制御系の場合、予め従動ローラでのベルト速度検出誤差(B)を算出して、目標速度数値に加えておけば、フィードバック制御時に減算器で、エンコーダ出力に含まれる速度検出誤差を打消すことができる。従動ローラでのベルト速度検出誤差(B)は、駆動ローラが一定角速度時の従動ローラの回転角速度変動(C)データを変換式に代入して求めることができる。ベルト速度検出誤差(B) $\Delta\omega_{e_CV}$ の変換式は、Fig.7に示した従動ローラの回転角速度変動(C)と従動ローラでのベルト速度検出誤差(B)の関係から(8)式となる。

$$\Delta\omega_{e_CV} = \frac{A_m(-\varepsilon_e)}{K} \sin(\theta_b + P - \beta + \tau) \quad \dots(8)$$

(8)式の A_m と P は、それぞれ従動ローラの回転角速度変動(C)データの振幅と位相を示し、その他の変数はベルトユニットの諸元から予め決定される。

まず、モータを一定角速度で駆動するか、または、Fig.8に示すように、従動ローラの回転角速度から駆動ローラの回転角速度を減算して、駆動ローラが一定角速度時に相当する従動ローラでの角速度変動データを取得する。次に、取得したデータからベルト周期成分

の振幅 A_m と位相 P を解析する。解析結果から、駆動ローラが一定角速度時の従動ローラの回転角速度変動(C)の $\Delta\omega_e$ は(9)式で表される。

$$\Delta\omega_e = A_m \sin(\theta_b + P) \quad \dots(9)$$

検出した振幅 A_m と位相 P を(8)式に代入して、従動ローラでのベルト速度検出誤差 $\Delta\omega_{e_CV}$ を算出する。フィードバック制御時には、 $\Delta\omega_{e_CV}$ が補正值となり、エンコーダ出力のベルト速度検出値を補正する。

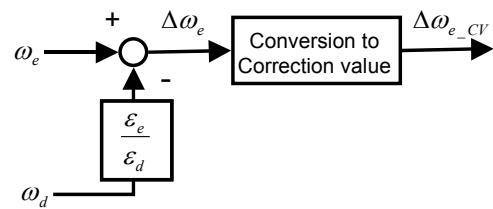


Fig.8 The calculation of the correction value.

2-4 新規フィードバック制御系

Fig.9に補正值を反映した新規フィードバック制御系を示す。エンコーダ出力と比較する目標速度数値は、目標平均速度数値に補正值算出アルゴリズムで得た値を加算したデータである。これにより、モータコントローラへの入力値は、従動ローラでのベルト速度検出誤差が除去された角速度偏差となる。モータコントローラは、低周波領域の外乱を抑制し、ベルトの速度安定性を保証している。各部品誤差による速度変動と、ベルト厚み変動による速度変動が抑制され、ベルト速度は高精度に一定となる。

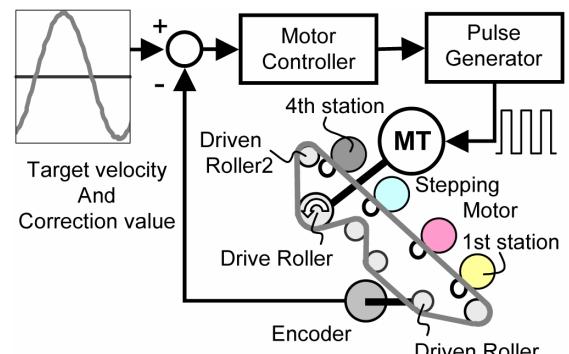


Fig.9 The new feedback control system.

2-5 ベルト定速性評価

新規フィードバック制御系を一般的な電子写真タンデムプリンターに搭載した時の補正值算出と、制御結果について説明する。

Fig.10に駆動ローラ一定角速度時のエンコーダ出力データ (Fig.8 $\Delta\omega_e$) とそのベルト周期変動の解析結果の曲線 ((9)式) と従動ローラでのベルト速度検出誤差への変換結果 (補正值) を示す。まず、取得したエンコーダ出力データから、ベルト周期の変動成分の振幅と位相を求める。つまり、(9)式で示したベルト周期変動成分の振幅 A_m と位相 P を算出する。算出方法は最小二乗法を用いた。算出した(9)式の近似曲線は、Fig.10の曲線(C)となる。振幅および位相数値から(8)式に従い、従動ローラのベルト速度検出誤差に変換してフィードバック制御時の補正值とする。補正值は、Fig.10の曲線(B)である。

次に、電子写真タンデムプリンターにおいて、従来のフィードバック制御と新規フィードバック制御を実行し、画像出力時にベルト位置変動を計測した結果を比較する。ベルト位置変動とは、ベルトの目標搬送距離に対するずれ量のこと、画像転写位置のずれ量と等しい。このベルト位置変動を計測するために、Fig.9に示す第2従動ローラに評価用のエンコーダを設置した。評価用エンコーダの出力データに対し、同様の補正值算出アルゴリズムでベルト位置変動の検出誤差を補正している。Fig.11にベルト位置変動の周波数解析結果を示す。新規フィードバック制御の採用で、ベルト回転周期 (0.15Hz) の変動成分が抑制されていることがわかる。本評価により、ベルトの高精度な定速性が確認された。

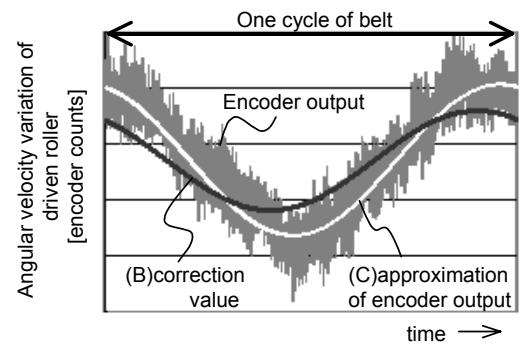


Fig.10 Angular velocity variation of the driven roller with constant speed of the drive roller.

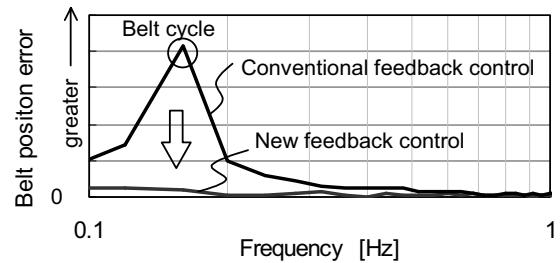


Fig.11 Experimental result of belt position error spectrum.

2-6 出力画像評価

画像の評価項目として、2色の副走査方向の出力画像長偏差を採用し、その評価結果を報告する。副走査方向の画像長は、ベルト厚み変動によるベルト速度変動と高い相関関係を持つ。Fig.12は、Table 1に示した一般的なベルトユニット構成におけるベルト速度変動 (図中実線) と第1ステーションと第4ステーションの出力画像長の関係を示している。図中、第1ステーションが1枚目と2枚目の用紙に画像を転写している時間を時間帯1-1, 1-2、第4ステーションがそれぞれの用紙に画像を転写している時間を時間帯4-1, 4-2としている。ベルト速度が速い時間帯1-1, 4-2に転写された画像全体は副走査方向に引き伸ばされる。一方、ベルト速度が遅い時間帯1-2, 4-1に転写された画像全体は副走査方向に縮小される。このように、ベルト厚み変動によるベルト速度変動は、第1ステーションと第4ステーションの画像長偏差を生じさせる。

Fig.13に従来のフィードバック制御と新規フィードバック制御を実行したときの第1ステーションと第4ステーションの画像長偏差を示す。新規フィードバック制御により、画像長偏差が大きく低減していることが確認された。2色間の画像長偏差の低減は、画像領域全体の色ずれ改善に大きく寄与している。

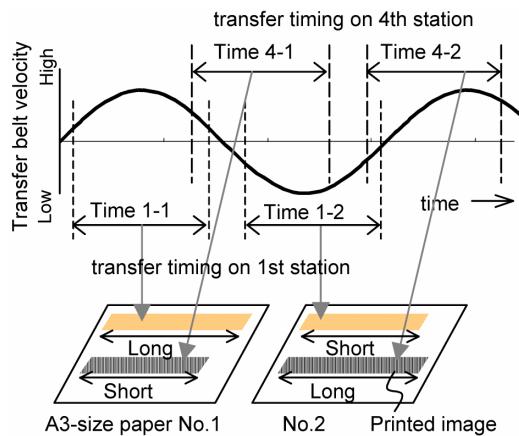


Fig.12 Relation between the belt velocity fluctuation and printed image on A3-size paper.

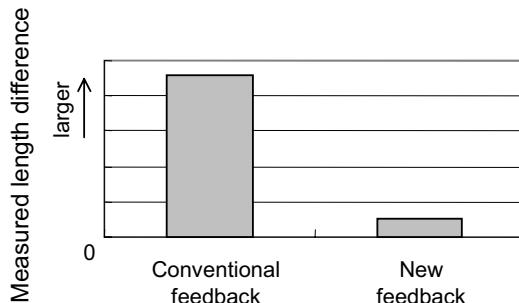


Fig.13 Measured length difference between 1st station's printed image and 4th station's one.

3. まとめ

従来のフィードバック制御技術では困難であった、ベルト厚み変動に起因するベルト速度変動を抑制する新規のベルト駆動制御技術を開発した。本制御技術は、従動ローラに設置したエンコーダ出力をフィードバックする制御において、事前に従動ローラの角速度データから、ベルト厚み変動による従動ローラでのベルト速度検出誤差を算出する。そして、この検出誤差を補

正しながらフィードバック制御を行なう。本制御系の効果は明確で、従来の制御効果に加えベルト周期変動も抑制され、より高精度なカラー画像が得られる。

4. 今後の展開

ベルト厚み変動と各ローラの回転角速度の関係や補正値算出アルゴリズムを定式化したことにより、本技術を、様々なベルトユニットに展開することが可能である。また、本技術は高画質化だけでなく、ベルト製造精度の緩和によるコストダウン効果も期待できるため、各機種への展開を実施する。

参考文献

- 1) S. Oohara et al. : Advanced Intermediate Transfer Belt Mechanism Driven by Photoconductor Belt, (2005) NIP21 : International Conference on Digital Printing Technologies Final Proceedings, 149-152.
- 2) K. Kudo et al. : Precision Measuring Technology of Surface Position for Belt and Drum Element, (1998) Ricoh Technical Report, No.24 : 109-112.
- 3) Y. Nakazato : Machine Optimizing Technologies for Color Registration of Electrophotography, Journal of the Imaging Society of Japan, (1999) Vol.38, No.3 : 27-32.