
レーザスペckルによる高精度移動量センサの開発

Development of Laser Speckle-Based Displacement Sensor with High Accuracy

高浦 淳*

Atsushi TAKAURA

二瓶 靖厚*

Yasuhiro NIHEI

上田 健*

Takeshi UEDA

清水 研一*

Kenich SHIMIZU

増田 浩二*

Koji MASUDA

工藤 宏一*

Koichi KUDO

要 旨

近年、画像機器分野において、高画質化に向けた高精度紙搬送制御を実現するため、紙搬送量を高速かつ高精度にリアルタイム計測できるセンサが求められている。しかしながら、従来のセンサにおいては、広い環境温度範囲における精度や高速化に課題を残していた。そこで今回、これらの課題を解決する移動量センサを新規に開発した。本センサでは、レーザ光を被検物に照射することで発生するスペckルパターンをエリアセンサに取り込み、フレーム間の画像相関演算によって移動量を計算しており、相関演算における背景ノイズ処理とサブピクセル推定最適化、温度補償型撮像光学系システムの搭載、演算回路のパイプライン処理とFPGA一体化により、線速100mm/sec、環境温度5℃～50℃において、計測誤差0.042%以下の安定した精度で計測できるようになった。また、業務用印刷機クラスの高線速450mm/secにおいて、室温で計測誤差0.050%以下の精度で計測できるようになった。

ABSTRACT

In this paper, characteristics and performances of the displacement sensor based on laser speckle image correlation are introduced. Well-tuned image processing algorithm enables the accuracy of this sensor for the application of sheet handling and control on high-end printing machines such as 450mm/s of paper handling velocity. Thermally optimized optical-mechanical compensation system enables sensing error stability less than 0.042% for environmental temperature variation range of 5℃～50℃.

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

1. 背景・目的

画像機器分野において、高画質化に向けた高精度紙搬送制御を実現するため、マークレスで非接触計測が可能な光学式移動量センサに対するニーズが高まっている。

従来の光学式移動量センサにおいては、測定範囲±100μm (2D)、データ更新レート20Hz、室温において分解能が1nmのセンサ¹⁾や、搬送紙面に垂直な方向のセンサ長が75mmほどで、搬送速度152.4mm/secにおいて、送り量50mmあたりの計測精度が±20μm以内のセンサ²⁾がある。

しかしながら、計測精度が高く、使用環境温度変動に対する計測精度の安定性や、高線速対応性、センサのコンパクト性においても優れたセンサを実現した例はこれまでになく、課題を残していた。

上記の背景に鑑み、本報告では、画像機器内における用紙の搬送量をマークレスで高精度にリアルタイム計測できるのみならず、従来よりも小型で動作温度範囲が広く、高線速対応性にも優れた光学式移動量センサの開発結果について述べる。

2. 本センサの測定原理

本センサの測定原理であるスペックル相関を用いた移動量検出については、既に詳細に解説されている³⁾ので、本稿では要点のみ簡単に説明する。

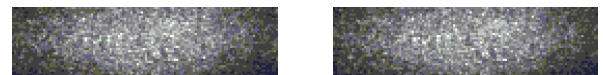
レーザ光を被検物の粗面に照射すると、表面で散乱した光が互いに干渉し、「スペックルパターン」と呼ばれるランダムな斑点模様を形成する。被検物が面内を移動すると、その動きに応じてスペックルパターンも移動する。このパターンの移動量を検出することで、被検物の変位が求められる。離間した時刻T1と時刻T2の各々においてスペックルパターンの画像（以下、「スペックル画像」と称する）を取得すると、被検物の移動に伴い観察領域が変化するため、スペックルパターンも変化することになる

が、T1とT2の時間間隔が短ければ、これらのスペックル画像間には高い相関が得られる。

Fig.1に、T1におけるスペックル画像パターンf、T2におけるスペックル画像パターンgを示す。また、下式(1)に従う相互相関演算を行った結果をFig.2に示す。

$$f * g = F^{-1}[F[f] \cdot \overline{F[g]}] \quad (1)$$

式(1)において、「 $\overline{\quad}$ 」は「複素共役」、 $F[\quad]$ は「離散フーリエ変換」を表し、 $F^{-1}[\quad]$ は「逆離散フーリエ変換」を表す。



(a) Speckle pattern image f (b) Speckle pattern image g

Fig.1 Speckle pattern image f and g.

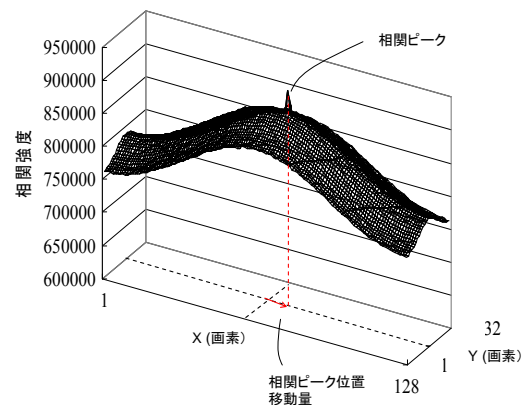


Fig.2 Result of correlation operation $f * g$.

Fig.2において、X、Yは画素番号を示しており、被検物の移動に伴い、相関ピーク位置が中心から移動する。したがって、この移動量から被検物の移動量を求めることができる。

しかしながら、高線速で高精度な計測を実現するためには、スペックルパターン画像を取得するフレームレートや画像相関演算などに様々な工夫が必要となってくる。

3. 本センサの特徴

3-1 本センサの構成・配置

Fig.3に本センサの構成配置を示す。本センサは、被検物を照明してスペックルパターンを形成するための、半導体レーザー光源（LD）とコリメート光学系（CL）を備えている。また、スペックルパターンの画像を取得するためのCMOSイメージセンサと、前記イメージセンサにスペックルパターンを集光結像するためのテレセントリック撮像光学系（OL）を備えている。イメージセンサで取得したスペックルパターンは、FPGA回路において相互相関演算を行ってリアルタイム出力される。センサのサイズ $W \times D \times H$ は、 $15 \times 60 \times 32$ [mm]である。

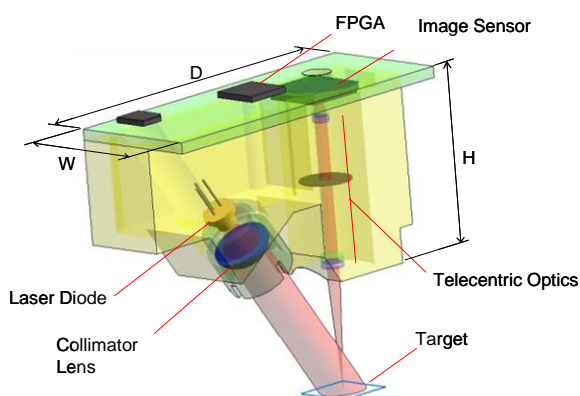


Fig.3 Schematic configuration of sensor module.

本センサの特徴について、以下に説明していく。

3-2 高精度化

3-2-1 取得画像の解像度

被検物が静止している状態においても、撮像光学系とCMOSセンサの組合せ条件によっては、取得画像の解像度が劣化し、ぼけた画像となる。また、被検物が移動している状態においては、取得画像が移動方向に流れることによって、解像度が劣化する。

ここでは、前者を静的な解像度、後者を動的な解像度と称することにする。

静的な解像度については、本センサの撮像光学系のF値や倍率により定まる光学的空間分解能が画素サイズより小さくなるように構成している。動的な解像度については、フレームレートを高速化するとともに、露光時間の調整によって相関ピーク位置の検出誤差が最小になるように、取得画像の流れ量を制御している。なお、被検物の移動速度と露光時間の積を流れ量と定義した。

3-2-2 背景ノイズの低減

Fig.4 (a)は、相互相関関数の相関強度分布を示している。照明光量分布に依存した背景ノイズの分布の上に測定対象物のフレーム間移動距離に対応するピークが乗っており、背景ノイズの分布形状によって、ピーク位置検出に誤差が生じてしまう。これに対し、本センサにおいては、相関ピークの演算フローにおける、フーリエ変換演算後の周波数空間において、ローカットフィルタによって、背景ノイズとなっている低周波数成分の値をゼロにする計算処理を行っている。この計算結果をFig.4 (b)に示す。これにより、背景ノイズが低減し、ピーク位置を正しく計算できるようになった。

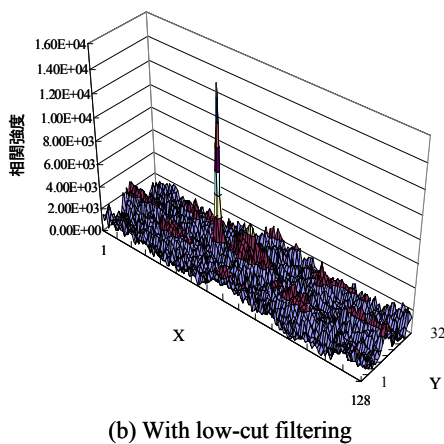
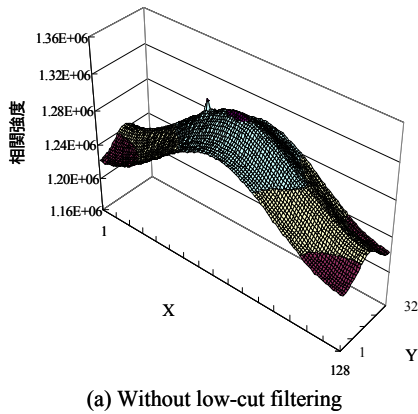


Fig.4 Cross-correlation function distribution.

3-2-3 サブピクセル推定

相関ピーク位置を求める際には、相互相関値が最も高い画素の位置を探す方法があるが、この方法では画素ピッチ以上の分解能が得られない。そこで、本センサでは、相関ピーク位置を画素以下の分解能で求めるサブピクセル推定を行うことによって、相関ピーク位置の検出精度を向上している。

サブピクセル推定に用いるフィッティング関数には等角直線フィッティング、パラボラフィッティング、等角パラボラフィッティングなどがある⁴⁾。

そこで、被検紙を手動で $\Delta X1$ 移動させてスペックル画像を取り込み、移動前後の画像の相互相関演算によって得られた相関ピーク位置の推定移動量 $\Delta X2$ と $\Delta X1$ の差、すなわち演算誤差を、上述の3つの

フィッティング関数について比較評価したところ、Fig.5に示す結果が得られた。

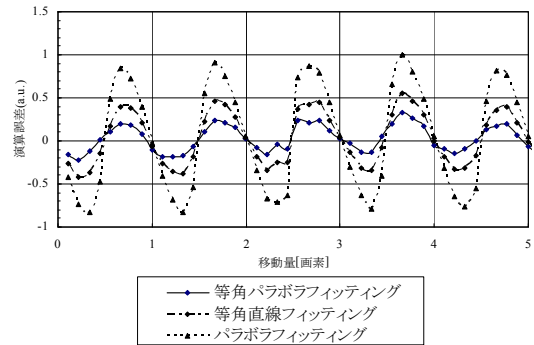


Fig.5 Relationship between fitting function and fitting error.

Fig.5から、いずれのフィッティング関数においても、移動量が画素ピッチの $N/2$ 倍 (N : 整数) 以外の部分では演算誤差が大きくなる傾向があることが分かる。これはピクセルロッキング現象といわれるものである。Fig.5の結果から、等角パラボラフィッティング方式を用いると、スペックルパターン画像の相互相関評価法において、ピクセルロッキング現象が生じにくくなり、画素の $N/2$ 倍以外の部分における演算誤差が小さくなることが分かった。

次に、画像の流れ量とピーク形状の関係をシミュレーション評価し、流れ量と演算誤差の関係を、上述の3つのフィッティング関数についてFig.6にプロットした。等角パラボラフィッティング関数では、流れ量に変化しても演算誤差は $0.05\mu\text{m}$ を超えず、演算誤差が小さく保たれていることがわかった。

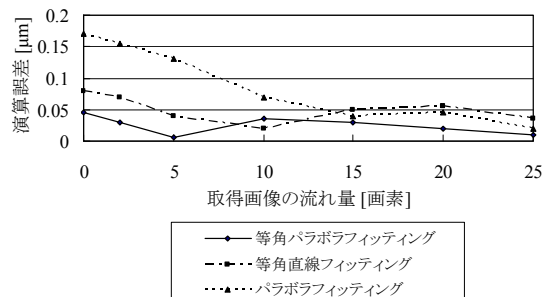


Fig.6 Relationship between image deletion and fitting error.

これらのシミュレーション評価結果から、本センサでは等角パラボラフィッティング方式を用いてサブピクセル推定を行った。

3-3 高速化

高線速において高精度計測を実現するためにはフレームレートを高くする必要があるため、本センサでは、最大フレーム周波数2,500[fps]で動作するグローバルシャッター方式のCMOSセンサを選定し、128画素×32画素の領域でスペckル画像を取得し、前述の相互相関演算によって移動量を求めている。上記フレームレートで転送される画像を演算処理できる回路を、FPGAに実装してリアルタイム計測を実現した。Fig.7に演算回路の構成を示す。演算回路は、画像取得回路、FFT回路、背景処理およびFFT⁻¹回路、サブピクセル処理回路で構成されている。

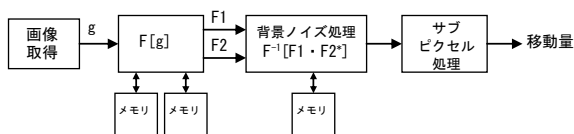


Fig.7 Block diagram of operation circuit.

また、これらの回路は、Fig.8に示すようなパイプライン処理を行っている。回路は、演算精度と回路規模を考慮し、16bitの固定小数点数で実装した。

これらの結果、最大フレームレート2,500[fps]の速度で演算結果をリアルタイム出力できるようになった。

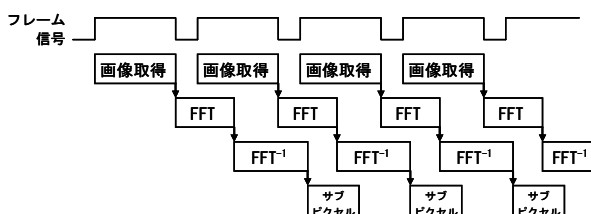


Fig.8 Block diagram of pipe-line operation.

3-4 温度補償

3-4-1 光学パラメータと検出長の関係⁵⁾

本センサは、半導体レーザやCMOSセンサのほか、FPGAやLD駆動用ICを搭載しているため、これらの発熱によってセンサの温度が上昇してセンサ構成部材が変形しても、センサが検出する移動量（以下、「検出長」と称する）が変化しないように、温度補償を行っている。

被検面の面内方向の移動速度V1とイメージセンサで検出される移動速度V2の関係は、式(2)で示される⁵⁾。

$$V2/V1 = M \cdot (D/D_b - 1) \quad (2)$$

式(2)について、Fig.9の光学配置図を用いて説明する。Fig.9に光源LD、コリメート光学系CL、移動する被検面A-A'、撮像光学系OL、ボイリング面B-B'、撮像面C-C'、ガウス像面E-E'の配置関係を示す。Fig.9において、B-B'は光源と共役な面である。B-B'ではV2方向の移動速度がゼロとなっており、ボイリング面と呼ばれている³⁾。E-E'は、移動する被検面A-A'と共役な面である。

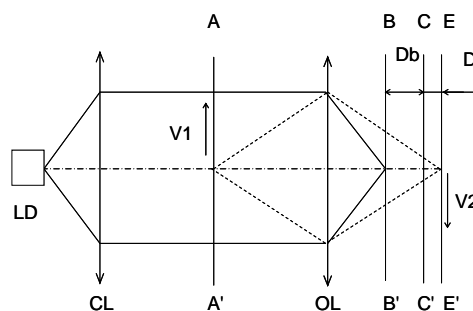


Fig.9 Configuration of conventional speckle sensor optics.

式(2)において、Mは撮像光学系の倍率、Dは撮像面とガウス像面の距離、D_bはボイリング面とガウス像面の距離である。検出長はV2の時間積となる。

Fig.9の配置では、光源、コリメート光学系、撮像光学系、イメージセンサの温度が変動するとそれらの位置も変動し、式(2)におけるM、D、および、 D_b も変動し、検出長も変動する。これに対し、本センサにおいては、式(2)における右边第2項のパラメータDおよび D_b に着目し、Fig.10に示すようなテレセントリック配置にしている。Fig.10の配置においては、CLで平行光束化された照明光はOLの前群OL1で絞りの位置に集光された後に発散して後群OL2で平行光束に変換されるため、光源の像の位置、すなわち、B-B'の位置は無限遠であり、 D_b の値は無限大になっている。そのため、式(2)の右边第2項は実質的に-1となり、検出長に誤差を発生させる主要因は撮像倍率Mの誤差のみとなる。

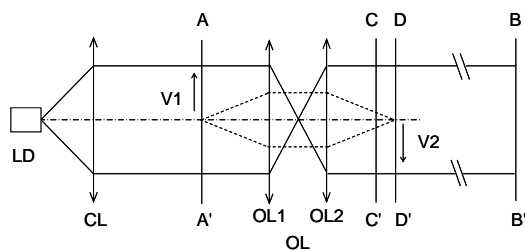


Fig.10 Optical configuration of sensor with telecentric optics.

このように、本センサでは、コリメート光学系やCMOSセンサの初期または経時の位置変動に対して検出長が変動しにくい構成にしたことにより、撮像倍率の温度変動の抑制によって検出長の温度変動を抑制することができるようになった。

3-4-2 撮像倍率の温度変動抑制

Fig.10のようにテレセントリック配置した撮像光学系において、前群OL1と後群OL2の各々の焦点距離の温度変動がゼロになる硝材を選定すると、近軸倍率の温度変動をゼロにできるが、実際には温度変動によってレンズ形状や群間隔が変化するため、実像高倍率の温度変動は厳密にはゼロにはならない。そこで、より高い精度で倍率の温度変動を抑制するため、前群OL1と後群OL2の群間隔と実像高倍率の

双方の温度変動の関係についてシミュレーション解析を行ったところ、Fig.11の結果が得られた。この結果から、群間隔の温度変動量が $0.327\mu\text{m}/\text{K}$ のとき実像高倍率の温度変化がゼロとなることが分かる。

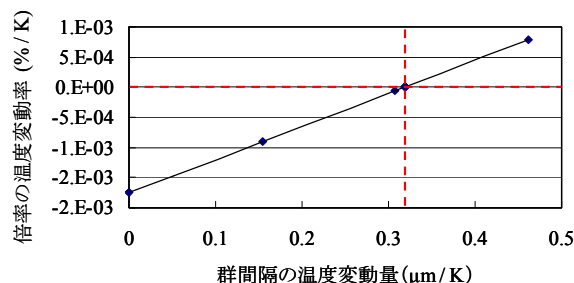


Fig.11 Correlation of change of distance of lens group and change of magnification by temperature.

上記の群間隔の温度変動特性を実現する鏡筒構成をFig.12に示す。前群OL1の単位温度あたりのZ方向変位量は $\alpha_1 \cdot Z_1$ 、OL2の単位温度あたりのZ方向変位量は $\alpha_2 \cdot Z_2 - \alpha_3 \cdot Z_3$ 、OL1とOL2の群間隔の単位温度あたりの変位量 dZ/dT は $\alpha_1 \cdot Z_1 - \alpha_2 \cdot Z_2 + \alpha_3 \cdot Z_3$ となっている (α : 線膨張係数)。 Z_1 は、OL1の初期位置で規定される。 $dZ/dT=0.327\mu\text{m}/\text{K}$ となるように、 Z_2 、 Z_3 、および鏡筒1~3の材料を設定した。

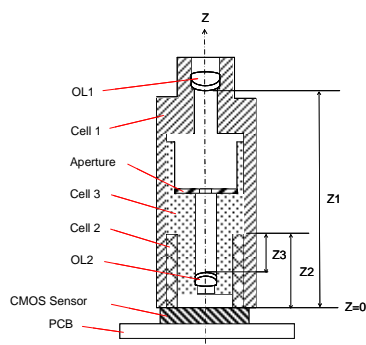


Fig.12 Schematic configuration of lens cell system.

3-5 小型化

本センサにおける撮像光学系の位置関係をFig.13に示す。物体側と像側のテレセントリック性を確保しており、前出の静的解像度を考慮した低倍率化によりOL2の焦点距離 f_2 を短くした上で、群間の光束に収束性を与えることによって、前群焦点距離に対してワーキングディスタンスが長く、後群焦点距離に対してバックフォーカスが短くなるよう設計し、光軸方向のセンササイズを小型化している。

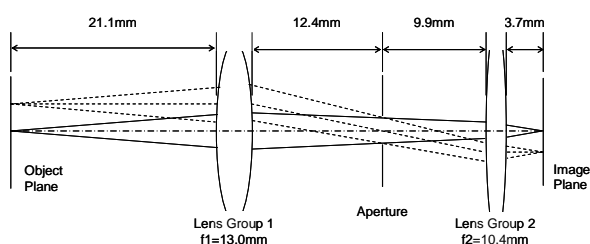


Fig.13 Telecentric imaging optics configuration.

3-6 本センサの基本特性

3-6-1 室温時の計測精度

光学定盤上で、位置決め精度 $0.2\mu\text{m}$ 、繰り返し位置決め精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ のリアステージを用いて、印刷用粘着紙を移動量 50mm 、移動速度 100mm/sec で4往復8回連続運動させた時の、8回ごとの計測誤差をFig.14に示す。グラフの横軸は、センサの電源投入後の経過時間を示している。室温環境では、温度補償前 (Before) の誤差変動幅は 0.147% と大きく、経時的にドリフトしているが、温度補償後 (After) の計測誤差はドリフトがなく、変動幅は 0.028% に改善した。

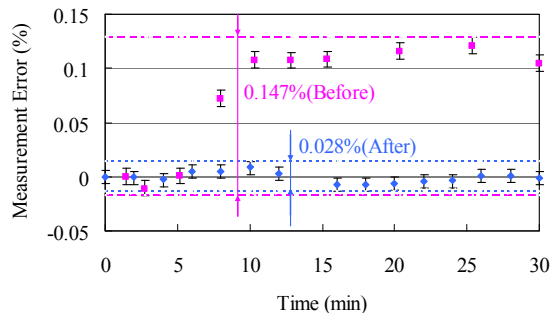


Fig.14 Transient characteristics of measurement error. (Velocity of 100mm/sec at room temperature)

3-6-2 計測誤差の環境温度変動特性

Fig.15, Fig.16, Fig.17に、恒温槽温度 5°C 、 25°C 、 50°C における計測誤差の評価結果を示す。

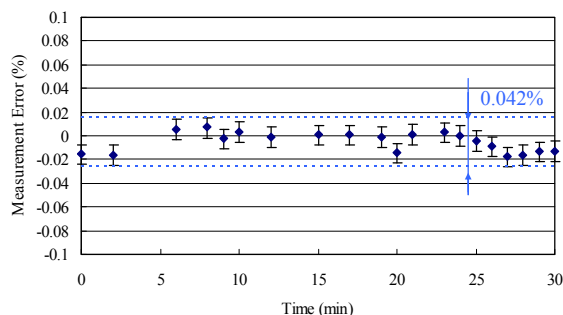


Fig.15 Transient characteristics of measurement error. (Velocity of 100mm/sec at 5°C)

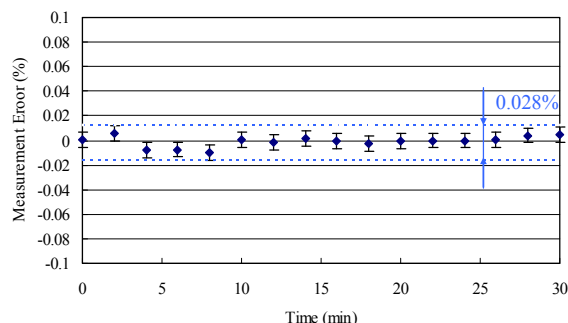


Fig.16 Transient characteristics of measurement error. (Velocity of 100mm/sec at 25°C)

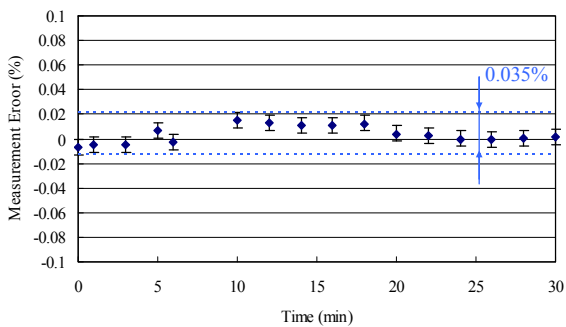


Fig.17 Transient characteristics of measurement error. (Velocity of 100mm/sec at 50°C)

いずれの温度においてもドリフトなく安定して計測できており、5°C~50°Cにおける計測誤差の変動幅は0.042%以下と小さい。これらの結果から、本センサの撮像光学系によって計測精度の環境温度変動が抑制されていることが分かった。本結果では、紙の移動量50mmに対する計測誤差は±10.5μm以内となっており、5°C~50°Cの温度範囲においても、従来のセンサ²⁾の計測誤差±20μmより誤差が小さいことが分かった。

3-6-3 高線速対応性

送り速度を450mm/secに高速化し、室温27°Cで計測誤差を評価した結果をFig.18に示す。計測誤差は変動幅0.050%以下であり、高線速でもドリフトなく安定して計測できることが分かった。

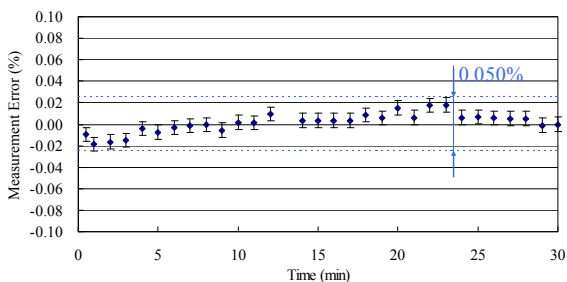


Fig.18 Transient characteristics of measurement error. (Velocity of 450mm/sec at room temperature)

3-6-4 デフォーカス特性

本センサは、撮像光学系がデレセントリックであるため、デフォーカスに伴う倍率の変動が極めて小さい。本センサの光軸方向へのデフォーカス量と、用紙搬送量の計測誤差との関係について、室温にて計測評価した結果をFig.19に示す。デフォーカス量±1mmに対し、計測誤差の変動幅は0.008%と極めて小さく、デフォーカス特性にも優れていることが分かった。

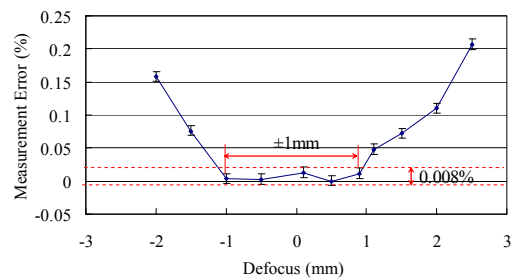


Fig.19 Measurement stability for defocusing position of sensor. (Velocity of 100mm/sec at room temperature)

3-6-5 本センサの基本性能のまとめ

Table 1に本センサの主要特性をまとめた。小型で、ワーキングディスタンスが長く、デフォーカス範囲が広く、高線速にも対応し、広い温度範囲で計測できるセンサとなっている。高画質化の進展に伴い、画像機器の紙搬送量の計測誤差として±0.1%以内が求められていることから、本センサの計測誤差は対応可能なレベルにあると考えられる。異なる紙種でも、ほぼ同様のバラツキで計測できている。

Table 1 List of typical performances.

サイズ:WxDxH	15x60x32 mm	
ワーキングディスタンス	20 mm	
デフォーカス範囲	±1 mm	
対応線速	~450 mm/sec	
使用環境温度	5~50 °C	
計測誤差	100mm/sec 25°C	0.028%
	100mm/sec 5~50°C	0.042%
	450mm/sec 27°C	0.050%

4. 応用計測事例

本センサを用いて、用紙搬送実験機の世界ムラを室温環境で計測評価した結果をFig.20に示す。紙送り速度100mm/secに対し、搬送ローラの偏心やトルク負荷変動による検出速度ムラ $\pm 0.22\text{mm/sec}$ を計測検出できた。これは送り速度の0.2%程度に相当し、レーザドップラー変位計では計測精度が不足して測定が困難であったが、本センサを用いることにより、非接触・マークレスで、リアルタイム計測できるようになった。

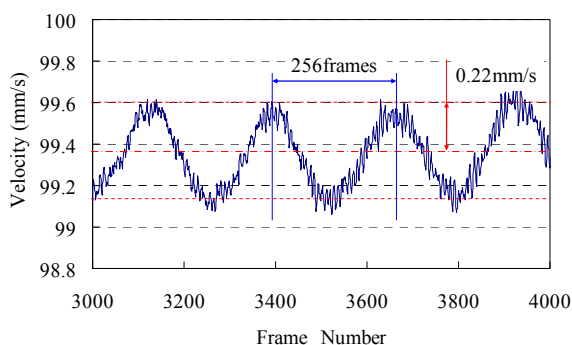


Fig.20 Measurement result of paper transfer velocity.

5. まとめと今後の展開

以上のように、従来よりも環境温度変動に対する計測精度の安定性や業務用印刷機クラスの高線速対応性に優れ、小型で画像機器内への設置許容性にも優れた、高精度移動量センサを開発した。

今後は、高線速への対応や市場における様々な紙種への対応を進めるとともに、マークレス、非接触で、計測精度が高く、環境温度変動やデフォーカス変動にも強いという本センサの特徴を活かし、広く応用分野を開拓していく予定である。

参考文献

- 1) 森洋篤ほか: 非接触画像相関二次元エンコーダ, 光計測シンポジウム2008 論文集, pp.88-91 (2008).
- 2) M.Casaldàliga et al.: HP's Optical Media Advance Sensor (OMAS), *NIP 27 and Digital Fabrication 2011 Technical Program and Proceedings*, pp.624-627 (2011).
- 3) 山口一郎: レーザースペックルとその応用, 光技術コンタクト, Vol.46, No.6, pp.245-252 (2008).
- 4) 新井元基, 鷺見和彦, 松山隆司: 画像ブロックマッチングにおける相関関数とサブピクセル推定方式の最適化, 情報処理学会 研究報告 CVIM-144-5, pp.33-40 (2004).
- 5) 高井信勝, 朝倉利光: 動的レーザースペックルの特性と速度測定への応用(I), レーザー研究, Vol8, No2, pp.37-45 (1980).