

# デジタルカメラの手ぶれ補正機構

芹 田 保 明

## Structures of Shake Compensation for Digital Cameras

Yasuaki SERITA

As shake compensation system for digital cameras, the optical compensation type has mainly been adopted. Recently, image sensor shift type was produced commercially, that is the shake compensation system through moving the image sensor itself. The feature technology in this new shake compensation system is an original ultrasonic linear actuator with a piezoelectric device and advanced technology of mechanism design.

**Key words:** gyro sensor, ultrasonic linear actuator, smooth impact drive mechanism (SIDM), friction combination, slider structure

近年、デジタルカメラにおいて、高倍率（7～12倍程度）ズームレンズ搭載機を中心に手ぶれ補正機能が搭載されてきている。デジタルカメラは、小型・軽量で機動性があることから手軽に撮影することができる反面、撮影時のホールド性がおろそかになりやすく、特に撮像レンズの焦点距離が200 mm（135換算）を超えるような領域では手ぶれの影響が大きくなり、手ぶれ補正機能の効果は絶大となる。手ぶれ補正技術は、ビデオカメラをはじめとして、一眼レフカメラの交換レンズや双眼鏡などに搭載されてきた。デジタルカメラの手ぶれ補正技術も、基本的には、これらの光学機器製品に搭載された技術を継承するものである。その中で、デジタルカメラ特有の要素を生かした技術も登場してきており、これらの技術について解説する。

### 1. デジタルカメラの手ぶれ補正技術の動向

#### 1.1 手ぶれ検出技術の概要

手ぶれ補正技術は、手ぶれを検出する技術と手ぶれを補正する技術の組み合わせによって成り立っている。表1に、おもな手ぶれ検出技術を示す。手ぶれ検出技術でよく採用されているのは、角速度センサー方式と画像の動きベ

クトル検出方式である。角速度センサー方式では、角速度センサーによって、手ぶれで発生するカメラの揺れの角速度を電気信号として検出する。角速度センサーは、振動中の質量体にある角速度ベクトルをもつ回転が加わると、質量体にコリオリ力が発生することを利用して、この回転の角速度を検出するものである。撮像画像に影響を与える手ぶれのおもな要因には、カメラを保持している人間の腕の筋肉振動（震え）によるものと、腕自体の揺れや体全体の揺れによるものがある。このような震えや揺れはいずれも、腕や体を介した回転運動である。したがって、角速度センサーを使用すれば、手ぶれ的主要因素であるこの回転運動の角速度を検出することができる。この検出のために、図1に示すようにカメラに対してピッチ（pitch）方向成分とヨー（yaw）方向成分に分けて、それぞれに1個の角速度センサーを対応させて検出し、2つの成分を合成することで、実際の手ぶれの方向と速度を算出する。

一方、画像の動きベクトル検出方式は、直接撮像素子から取り出す画像データを使って手ぶれを検出する。ビデオカメラのように一定周期で連続的に撮像素子から画像を出力する場合、各画像間の特定領域に対して、特徴部の移動状態などから画像の動きベクトルを求めることで手ぶれを

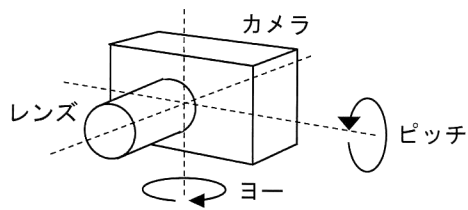


図1 手ぶれの方向。

検出することができる。この方式は別設の手ぶれ検出用センサーを必要としない優位点はあるが、原理的に静止画に対する手ぶれの検出ができない。

### 1.2 手ぶれ補正技術の概要

表2に、おもな手ぶれ補正技術を示す。手ぶれ検出手段によって検出した手ぶれを補正する方式には、撮像中にぶれを抑制する方式と、撮像後の画像に対して処理を行う方式がある。前者には光学式補正やメカニカル補正があり、後者には電子式補正や画像処理補正がある。光学式補正は、撮像レンズに手ぶれ補正用の光学系を設け、この光学

系によって撮像中に撮像レンズ系の光路を補正する。メカニカル補正には、イメージセンサーを移動させて、手ぶれで撮像面上の結像位置がずれないようにするものが含まれる。これに対して電子式補正は、所定フレームレートで読み出す画像から、手ぶれに対応させて同一画像領域を切り出す方式である。また、画像処理方式は撮像後の画像に対して、ぶれの軌跡情報を使用して、演算処理によってぶれの影響を取り除いた画像をつくり出す。この画像処理方式は、演算処理の負荷が大きいためソフトウェア商品としての実用化が主であり、また技術的な課題も残っており、今後期待される技術といえる。

### 1.3 デジタルカメラ搭載の手ぶれ補正技術

表3に、手ぶれ補正機能を搭載したおもなデジタルカメラの一覧を示す。これまでにデジタルカメラで採用された手ぶれ補正方式は、DiMAGE A1, A2を除いては、角速度センサー方式の手ぶれ検出と光学式補正のひとつである補正レンズシフト方式の手ぶれ補正の組み合わせである。DiMAGE A1, A2も手ぶれ検出は角速度センサー方式

表1 おもな手ぶれ検出技術。

方式	技術内容	特徴	用途
角速度センサー方式	コリオリ力の発生を利用して手ぶれの状態を角速度として電気信号で取り出す	<ul style="list-style-type: none"> <li>ぶれの状態を直接検出可能</li> <li>被写体の輝度に左右されない</li> <li>動画/静止画の両方で利用可能</li> </ul>	ビデオカメラ, デジタルカメラ, SLR 交換レンズ, フィルムカメラ
画像の動きベクトル検出方式	撮像素子から連続的に画像データを読み出して各画像間での像の移動状態からぶれを検出する	<ul style="list-style-type: none"> <li>ぶれ検出に別センサーが不要</li> <li>暗いところでは検出能力が低下する</li> <li>静止画撮影では利用不可</li> </ul>	ビデオカメラ

表2 おもな手ぶれ補正技術。

分類	方式	技術内容	特徴	用途
光学式補正	補正レンズシフト方式	撮像光学系の中にもぶれ補正のための補正専用レンズを設けて、アクチュエーターによって手ぶれをうち消すように移動させる	<ul style="list-style-type: none"> <li>光学系に合わせて最適設計が可能</li> <li>画質劣化がほとんどない</li> <li>動画/静止画の両方で利用可能</li> <li>撮像レンズが大きくなる</li> </ul>	ビデオカメラ, デジタルカメラ, SLR 交換レンズ, フィルムカメラ
	頂角可変プリズム方式	高屈折液体を充填させた頂角可変プリズムの頂角をアクチュエーターで駆動して、光路を変えて手ぶれをうち消す	<ul style="list-style-type: none"> <li>撮像レンズに追加する形で使える</li> <li>画質劣化がほとんどない</li> <li>動画/静止画の両方で利用可能</li> <li>撮像レンズが大きくなる</li> </ul>	ビデオカメラ, デジタルカメラ, SLR 交換レンズ, フィルムカメラ
メカニカル補正	イメージセンサーシフト方式	イメージセンサーをアクチュエーターによって、手ぶれをうち消すように移動させる	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存レンズをそのまま使える</li> <li>画質劣化がほとんどない</li> <li>動画/静止画の両方で利用可能</li> <li>コンパクトに構成可能</li> </ul>	ビデオカメラ, デジタルカメラ
電子式補正	画像切り出し方式	所定レートで画像を読み出し、各画像間のぶれに対応させて、各画像から同一画像領域を切り出して使用することで動画における手ぶれを抑制する	<ul style="list-style-type: none"> <li>別設のセンサーや補正機構が不要</li> <li>撮像素子のフル画像エリアを使用できないため、画質が劣化する</li> <li>静止画には利用できない</li> </ul>	ビデオカメラ
画像処理補正	ぶれ軌跡復元方式	撮像した画像に対してぶれの軌跡情報を使用して復元演算処理を行い、ぶれの影響を取り除いた画像をつくり出す	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトウェア処理のみで実現可能</li> <li>別設のセンサーや補正機構が不要</li> <li>演算処理が重く時間がかかる</li> <li>画質劣化を伴う可能性あり</li> </ul>	デジタルカメラ

表 3 手ぶれ補正機能搭載デジタルカメラ (2004 年 4 月現在).

製品名	メーカー	発売年月	撮像素子の仕様 (撮像素子とレンズ)	手ぶれ補正方式
CAMEDIA C-2100 UltraZoom	オリンパス	2000 年 8 月	211 万画素 1/2 型 CCD/ $f$ 7.0~70.0 mm $F$ 2.8~3.5	補正レンズシフト方式
CAMEDIA E-100 RS	オリンパス	2000 年 11 月	151 万画素 1/2 型 CCD/ $f$ 7.0~70.0 mm $F$ 2.8~3.5	補正レンズシフト方式
PowerShot Pro90IS	キヤノン	2001 年 2 月	334 万画素 1/1.8 型 CCD/ $f$ 7.0~70.0 mm $F$ 2.8~3.5	補正レンズシフト方式
PowerShot S1 IS	キヤノン	2004 年 3 月	330 万画素 1/2.7 型 CCD/ $f$ 5.8~58.0 mm $F$ 2.8~3.1	補正レンズシフト方式
LUMIX FZ1	松下電器産業	2002 年 11 月	211 万画素 1/3.2 型 CCD/ $f$ 4.6~55.2 mm $F$ 2.8 (全域)	補正レンズシフト方式
LUMIX FZ2	松下電器産業	2003 年 8 月	211 万画素 1/3.2 型 CCD/ $f$ 4.6~55.2 mm $F$ 2.8 (全域)	補正レンズシフト方式
LUMIX FZ10	松下電器産業	2003 年 10 月	423 万画素 1/2.5 型 CCD/ $f$ 6.0~72.0 mm $F$ 2.8 (全域)	補正レンズシフト方式
LUMIX FX1	松下電器産業	2003 年 11 月	334 万画素 1/2.5 型 CCD/ $f$ 5.8~17.4 mm $F$ 2.8~4.9	補正レンズシフト方式
LUMIX FX5	松下電器産業	2003 年 11 月	423 万画素 1/2.5 型 CCD/ $f$ 5.8~17.4 mm $F$ 2.8~4.9	補正レンズシフト方式
DiMAGE A1	コニカミノルタ	2003 年 9 月	530 万画素 2/3 型 CCD/ $f$ 7.2~50.8 mm $F$ 2.8~3.5	イメージセンサーシフト方式
DiMAGE A2	コニカミノルタ	2004 年 2 月	830 万画素 2/3 型 CCD/ $f$ 7.2~50.8 mm $F$ 2.8~3.5	イメージセンサーシフト方式

手ぶれの検出はすべて角速度センサー方式。画素数表記はすべて総画素数を表示。

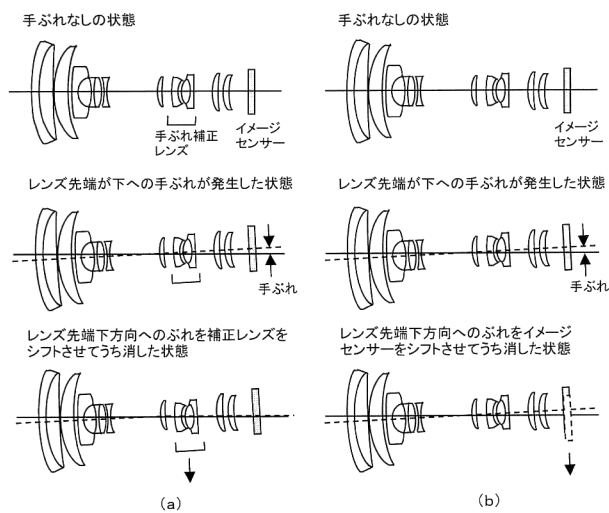


図 2 補正レンズシフト方式手ぶれ補正とイメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の原理。(a) 補正レンズシフト方式手ぶれ補正, (b) イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正。

であるが、手ぶれ補正にはイメージセンサーシフト方式が採用された。デジタルカメラは静止画撮影が主であり、高画素数で高画質が求められることから、電子式補正は使用できない。また、2003 年 11 月に LUMIX FX1, FX5 という 3 倍光学ズームのコンパクト機に手ぶれ補正が搭載され、それまでの高倍率光学ズーム搭載機のみへの搭載か

ら、より普及が進むべき状況となってきた。今後は、このようなコンパクト機に対する手ぶれ補正搭載が増える予想され、技術的にもさらに小型、軽量、低コスト対応が進むと思われる。

## 2. イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正技術

### 2.1 イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の原理

ここからは、最新の手ぶれ補正技術であるイメージセンサー (CCD; charge coupled device) シフト方式手ぶれ補正について解説する。イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正は、光学式手ぶれ補正である補正レンズシフト方式と比較した場合、単純には手ぶれ補正のために移動させるものが補正レンズであるかイメージセンサーであるかの違いだけで、他はほとんど同じと考えてよい。図 2 に、補正レンズシフト方式 (a) とイメージセンサーシフト方式 (b) の手ぶれ補正の原理を比較して示す。図では、レンズ先端下方向への手ぶれが発生した場合に、それぞれが手ぶれによってイメージセンサーの結像位置が本来の位置からずれてしまうのをうち消すように、補正レンズとイメージセンサーを移動させている。どちらの方式も、静止画像に対して、高画質を維持しながら十分な手ぶれ補正効果を得ることができる。特にイメージセンサーシフト方式の手ぶれ補正は、光学系を動かさないので、手ぶれ補正を行うことで

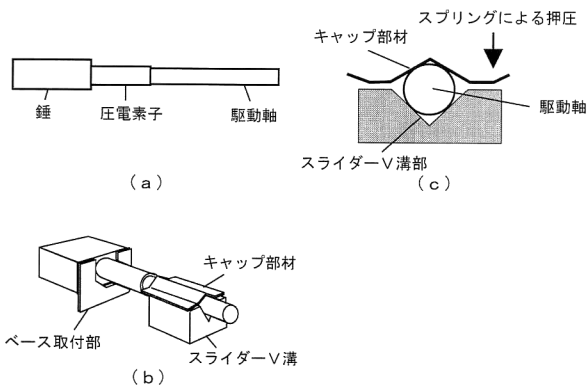


図3 SIDM（超音波リニアアクチュエーター）の構造。(a) アクチュエーター本体、(b) SIDMの機構部、(c) 駆動軸とスライダ係合部。

レンズ収差が発生するようなこともなく、高画質手ぶれ補正実現に有効である。以下に、イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の特徴を示す。

- ① 基本的な画質の劣化を伴わずに手ぶれ補正が可能である（高画質手ぶれ補正レンズの実現）
- ② レンズ・鏡胴に手ぶれ補正機構を搭載することなく、撮像レンズの大型化を防げる
- ③ 既存の撮像レンズに対しても小変更で搭載可能である
- ④ レンズ交換式デジタル一眼レフカメラにおいては、カメラ本体に手ぶれ補正機構が搭載できるので、すべての交換レンズで手ぶれ補正機能が有効になる

## 2.2 イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の機構ユニット

### 2.2.1 アクチュエーター機構

次に、DiMAGE A1, A2 に搭載されたイメージセンサーシフト方式手ぶれ補正技術について具体的に説明する。補正レンズシフト方式手ぶれ補正に対して、イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の最も異なるところは補正駆動機構である。補正レンズシフト方式手ぶれ補正ではほとんどにボイスコイル型の電磁アクチュエーターが採用されているが、これは所定の範囲内で往復運動をさせる機構として、シンプルな構成でメカ連結が少なく、機構のガタを小さくできるからである。しかし、イメージセンサーを移動させるには、さらに高精度な駆動メカニズムが必要になる。イメージセンサーの移動においては、わずかな機構ガタによる振動が直接撮像画像に影響してしまうからである。この課題を克服するために、本イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正では、駆動エンジンとして専用に超音波リニア駆動アクチュエーターである SIDM (smooth

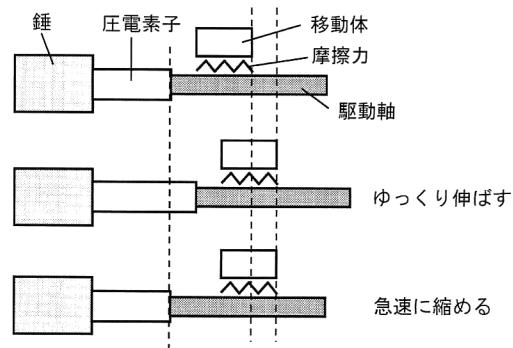


図4 SIDMの動作原理。

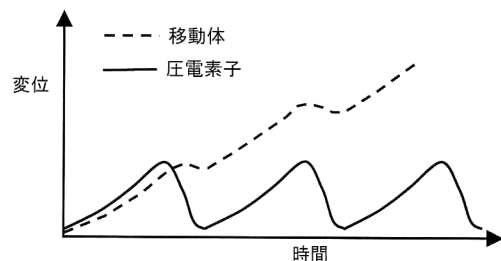


図5 圧電素子と移動体の動き。

impact drive mechanism)<sup>1)</sup>を開発し、機構ガタが発生しない構成の駆動機構を構築した。SIDMのアクチュエーター本体は、図3(a)に示すように、圧電素子を中心に錘と駆動軸から構成される。さらに、図3(b)のように、錘の部分はベース取付部に固定される。駆動軸に対しては、移動体であるスライダのV溝部とキャップ部材が挟み込む形でスプリングによって押圧されている(図3(c))。この状態で駆動軸とスライダ、キャップ部材は摩擦結合している。

このSIDMの駆動原理を説明する。図4に示すように圧電素子に電圧を印加して、圧電素子をゆっくり伸張させると、摩擦結合している移動体も駆動軸といっしょに移動する。次に圧電素子を急速に縮めると、駆動軸は逆方向に戻るが、移動体は動摩擦で滑ってしまい、その位置にとどまる。この動作を連続的に繰り返すと、移動体は駆動軸上を図の右方向へ移動していくのである。この様子を圧電素子と移動体の変位として表したのが図5である。圧電素子の伸び縮みの速度関係を逆にすると、移動体は反対方向に駆動軸上を移動する。移動体は常に駆動軸に摩擦結合した状態で移動するので、移動中や駆動方向反転時において機構ガタはなく、高精度にイメージセンサーをシフトさせることが可能である。この駆動原理では、圧電素子にはノコギリ波形の電圧を印加する必要があるが、実際にはアクチュエーターの共振周波数付近の周波数を駆動周波数として、そのデューティー比が50%ではない(例えば33%や67%)

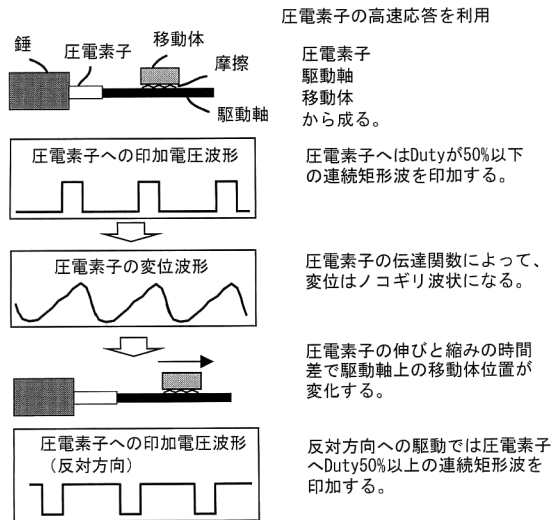


図6 SIDMの駆動方法。

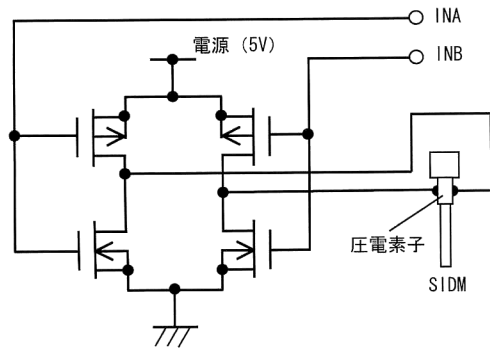


図7 駆動回路の構成。

矩形波を印加すると、圧電素子の伝達特性により、圧電素子はノコギリ波形の伸縮を行う。移動体は、圧電素子の伸縮時間差に応じて移動方向と移動速度が決まる(図6)<sup>2)</sup>。この駆動方法では、SIDM 駆動は単純な矩形波で駆動することが可能であり、通常のHブリッジ型トランジスタ構成の汎用モーター駆動用ICで十分駆動が可能である。図7には、本アクチュエーターの基本駆動回路構成を示す。また、図8にこの駆動回路に対応した駆動波形を示す。駆動回路は4つのFETでHブリッジを構成している。2つの制御入力INA、INBにお互いに位相の反転したパルスを入力すると、駆動回路の出力から圧電素子に対して、入力パルスに応じた電圧が印加される。このとき、パルスの反転ごとに圧電素子は繰り返し反対極性に充電され、圧電素子の電極間には+電源電圧から-電源電圧が印加される。これで電源電圧の2倍の伸縮を取り出すことができ、電源電圧も5~6Vレベルで使用可能である。

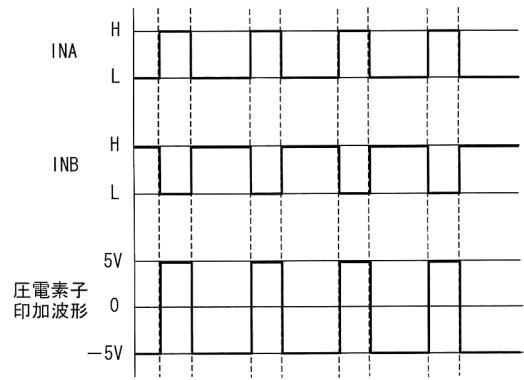


図8 圧電素子印加波形。

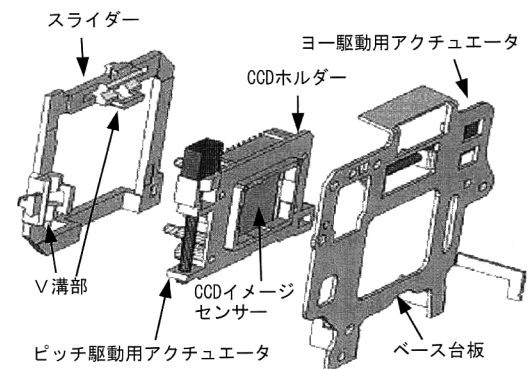


図9 駆動ユニット構成。

### 2.2.2 駆動ユニット構成

図9に、イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正の駆動ユニット構成を示す。ユニットのベース台板に、ヨー方向の補正駆動用のアクチュエーターを固定する。スライダは、それ自体がヨー方向への移動体である。このスライダに、ピッチ方向の補正駆動用アクチュエーターが固定された CCD ホルダーを、アクチュエーター駆動軸とスライダのV溝部で摩擦結合させる。CCDホルダーには、CCD搭載用基板に固定された CCD が搭載される。この CCD ホルダーはピッチ方向への移動体である。このスライダと CCD ホルダーで XY ステージ構造をなし、CCD を二次元方向へ移動可能とした。スライダは駆動ユニットの中心をなす部品であり、以下の特徴をもたせている。

- ① 2軸のアクチュエーターの受けとなる2つのV溝を同一部材上に構成するとともに、一体成形部材として、2軸のアクチュエーターの位置精度を確保している
- ② 特殊合金ダイキャストにより軽量化と高剛性を実現
- ③ V溝部の摺動面の面精度を数 $\mu\text{m}$ 以下レベルとして、駆動摩擦力の安定化に貢献

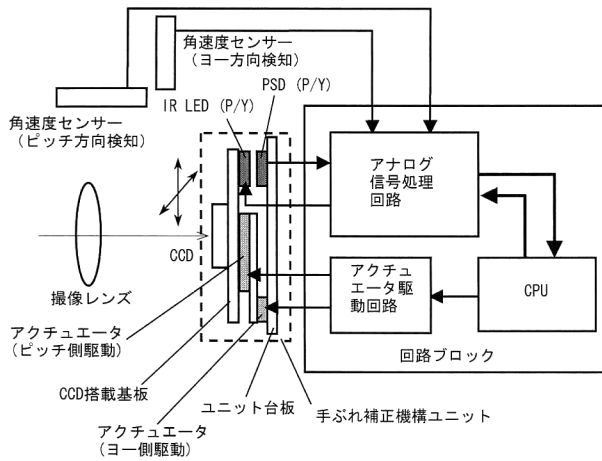


図 10 イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正システムのブロック構成。

④ スライダー表面への化学処理と摩擦面に対する潤滑剤の最適化により、十分な駆動耐久性を実現  
 これらの特徴技術により、高精度スライド機構が実現できた。

### 2.3 システムハードウェアと制御系

図 10 に、イメージセンサーシフト方式手ぶれ補正のシステム構成図を示す。イメージセンサー駆動機構の移動位置検出には PSD (position sensitive device) と赤外 LED の組み合わせを用い、ピッチ側とヨー側のそれぞれで移動体の位置を検出する。ぶれを検出する角速度センサーからの出力と駆動機構の移動位置検出用 PSD からの出力とを、アナログ信号処理回路でフィルタリングや信号増幅処理を行う。手ぶれ補正のシステム制御は、専用の CPU によるサーボ駆動制御である。SIDM の速度制御は、駆動パルスのデューティー可変制御で行う。パルスデューティー制御は電圧可変制御に比較して駆動回路がシンプルであり、低速駆動が容易である。図 11 に、駆動信号パルスのデューティーに対する移動体の移動速度特性を示す。駆動信号パ

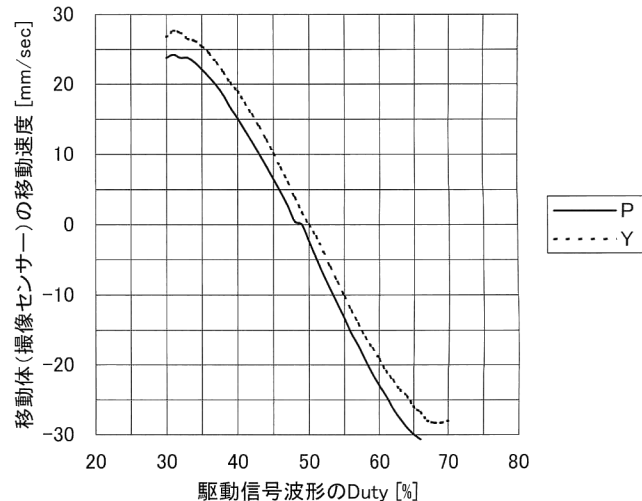


図 11 SIDM の駆動波形デューティーと移動体速度。

ルのデューティーに対して、移動体の移動速度がほぼリニアに変化している。また、デューティー 50% 付近の不感帯が小さく、高性能な駆動制御が実現できた。

以上、デジタルカメラの手ぶれ補正機構と技術について解説した。いまや手ぶれ補正はデジタルカメラの重要な機能となっており、搭載機種が増えていくと予想される。技術的には、光学式手ぶれ補正やイメージセンサーシフト方式手ぶれ補正が主流となって、小型、高性能化が進むと考えられる。また、将来的には画像処理方式の技術進展にも期待したい。

### 文 献

- 1) 吉田龍一, 岡本泰弘, 樋口俊郎, 浜松 玲: “スムーズインパクト駆動機構 (SIDM) の開発—駆動機構の提案と基本特性—”, 精密工学会誌, **65**, No.1 (1999) 111.
- 2) 吉田龍一, 岡本泰弘, 岡田浩幸: “スムーズインパクト駆動機構 (SIDM) の開発 (第 2 報)—駆動電圧波形の最適化—”, 精密工学会誌, **68**, No.4 (2002) 536-541.

(2004 年 4 月 15 日受理)