
デジタルカメラの5軸5段手ぶれ補正技術

5-axis 5-shutter-step Shake Reduction for Digital Cameras

村松 功一* 川崎 我一*
Koich MURAMATSU Gaku KAWASAKI

要 旨

デジタルカメラには、ぶれの少ない良好な画像を撮影可能とする手ぶれ補正機能が搭載されている。これまでに、カメラの水平、垂直軸まわりの回転運動である角度ぶれを補正できるものが数多く発売されている。近年では、光軸まわりの回転ぶれや、水平、垂直方向のシフトぶれも補正できるものが登場し、5軸補正カメラとして発売されている。ユーザーの手ぶれ補正に対するニーズは益々高まっており、5軸補正機能の性能向上が望まれている。しかしながら、5軸の手ぶれ補正機能のうち加速度センサーで検出するシフトぶれは、検出誤差が大きく補正性能が低い。また、ジャイロセンサーを用いて検出する角度ぶれについても、長秒露光撮影では補正誤差がある。そこで本研究では、独自の加速度センサー配置とシフトぶれ検出技術を開発し、更にジャイロセンサー出力のフィルタリング最適化により、角度ぶれ補正を高精度化し、5軸5段手ぶれ補正技術を確立した。本カメラの手持ち撮影評価をした結果、自他社を含む従来カメラに対し、よりぶれの少ない良好な画像を得ることができた。

ABSTRACT

Digital cameras have a shake-reduction system that enables the user to shoot a good image without blur. So far, many companies have released cameras that stabilize the image to avoid angular blur generated around the horizontal and vertical axis of a camera. In recent years, some companies have released 5-axis stabilization cameras that stabilize the image to avoid rotational blur generated around the optical axis and translational blur generated parallel to the horizontal and vertical axes in addition to stabilizing the angular blur. As a result of the release of these new cameras, users have demanded higher and higher shake-reduction system performance. They demand both the stabilizing function of 5-axis stabilization and higher performance. However, the stabilization of translational blur detected by an acceleration sensor has more error. Moreover, the performance of the stabilization of angular blur decreases when users shoot with a long exposure time.

Therefore, in this study, we have developed a method for placing an acceleration sensor and technology for detecting the translational blur with a small error. Furthermore, we have enhanced the accuracy of the stabilization of angular blur. As a result, we have developed a 5-axis 5-shutter-step shake-reduction system. This new camera can take fine photographs that are better than those of conventional cameras.

* 新規事業開発本部 SV技術開発センター
Smart Vision Technology Development Center, New Business Development Division

1. 背景と目的

デジタルカメラには、ぶれの少ない良好な画像を撮影可能にする手ぶれ補正機能が搭載されている。これまでに、Fig. 1の①、②で示す回転運動による角度ぶれを補正する2軸補正タイプのものが数多く発売されている。更に近年では、Fig. 1の③で示すZ軸まわりの回転ぶれや、④、⑤で示す並進運動によるシフトぶれも補正する5軸補正タイプのものが登場している。

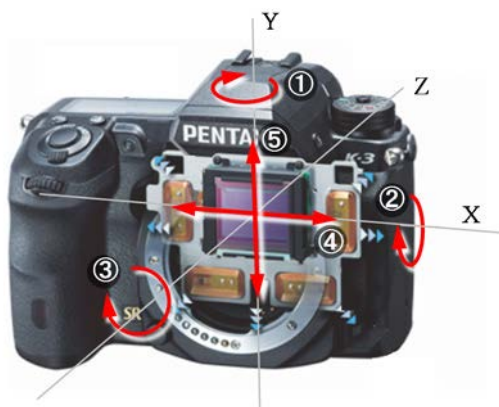


Fig. 1 Vibration of hand shaking.

5軸補正とは、Fig. 1で示す①～⑤の手ぶれ成分を検出し、カメラ内部の光学部材を駆動して補正する技術である。一般的に、①～③の角度ぶれと回転ぶれはジャイロセンサーで検出し、④、⑤のシフトぶれは加速度センサーで検出する。手ぶれ補正は、これらの検出結果からぶれ量を求め相殺するように光学部材を駆動する。Fig. 2に、イメージセンサーを駆動して5軸補正の様子を示す。イメージセンサーは、図中の矢印で示すX、Y方向の並進駆動と、Z軸まわりの回転駆動をする。Fig. 1の④、⑤のシフトぶれは、各々X、Y方向に並進駆動して補正できる。③の回転ぶれは、回転駆動して補正できる。更に、光学的特性により①、②の角度ぶれも、各々X、Y方向の並進駆動に置き換えて補正できる。従って5軸補正は、検出こそ5軸必要だが駆動は3方向で実現できる。本原理に基づき、近年、既にイメージセンサーの3方向駆動技術を有するカメラメーカーは、

③の回転ぶれ検出と④、⑤のシフトぶれ検出技術を追加的に開発し、3方向駆動技術と組み合わせて5軸補正カメラとして発売している。

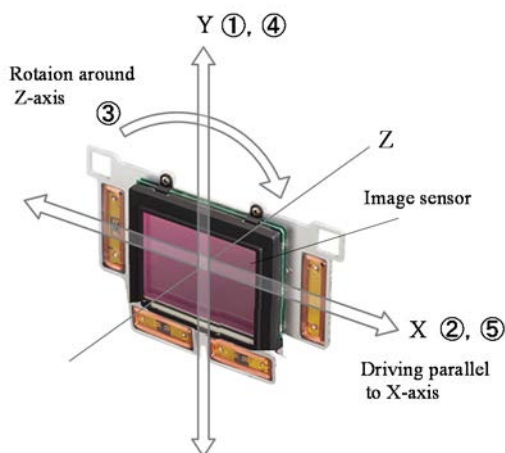


Fig. 2 3-axis driving of image sensor.

上記のように、5軸補正カメラが市場投入され認知されてきている環境下で、カメラユーザーの手ぶれ補正に対する期待は益々高まっており、5軸の手ぶれ補正機能と補正性能の更なる向上が必要とされている。

本研究では既に、イメージセンサーを3方向に駆動する技術、および角度ぶれを検出する技術は構築してある。従って、5軸補正機能を達成するためには、回転ぶれとシフトぶれの検出を実現すればよい。ここで、回転ぶれは角度ぶれと同様にジャイロセンサーで検出できるため、既存技術の適用で検出することができる。一方で、シフトぶれの検出は加速度センサーを使用するため、新規に検出方法を開発する必要がある。加速度センサーはジャイロセンサーと異なり多くの検出誤差が含まれるため、その誤差を除去するアルゴリズムが必要である。

そこで本研究では、誤差の少ないシフトぶれ検出方法を開発し5軸補正機能を達成すること、および角度ぶれの検出精度を高め補正性能を向上させることを目的とする。なお本論文では、本研究開発の進め方、特に、誤差の要因解析とそれに基づく対応策の考え方、そして効果の実験検証を中心に述べる。

2. シフトぶれ補正技術

2-1 シフトぶれ検出の課題

シフトぶれ検出で使用する加速度センサーには、原理的に下記(1)～(3)の検出誤差が含まれる。

- (1) 重力成分による検出誤差
- (2) イメージセンサーと加速度センサー間距離による推定誤差
- (3) カメラ姿勢変動による検出誤差

これまでに、上記検出誤差抑制のため、ジャイロセンサー出力を利用する方法²⁾が研究されている。しかしながら、この方法は演算負荷が増える上に、ジャイロセンサー出力に含まれる誤差が副作用となり、十分な誤差抑制ができない恐れがある。

そこで本研究では、加速度センサー出力のみを使い、演算負荷、および上記(1)～(3)の検出誤差を抑制できるシフトぶれ検出方法を確立することを課題とする。

2-2 シフトぶれ検出誤差の要因解析

2-2-1 手ぶれのモデル化

はじめに本研究では、補正すべきシフトぶれを把握するため、手ぶれを計測しモデル化を試みる。Fig. 3に示すように、複数のレーザー測長器と確認検算用のジャイロセンサーを使った専用の実験環境を構築し、手持ち撮影時の角度ぶれとシフトぶれの分離計測を行う。

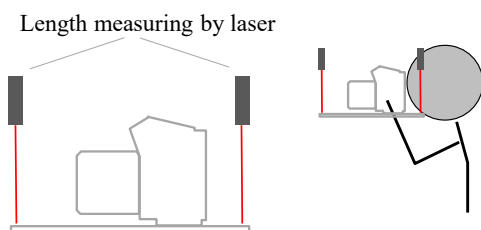


Fig. 3 Measurement of hand shake.

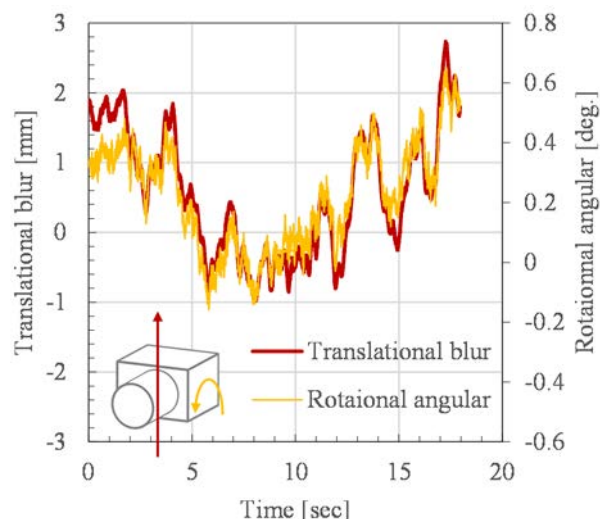


Fig. 4 Experimental result of translation blur and rotational angular.

Fig. 4に測定結果を示す。横軸は時間[sec]、赤色はカメラの鉛直方向のシフトぶれ量[mm]、黄色は水平軸まわりの回転角度[deg.]を表す。本結果を解析することで、手ぶれは、下記(1), (2)の特性があることが分かる。Fig. 5にモデル化して示す。

- (1) シフトぶれの主成分は、1 Hz以下の低周波振動である。本研究では、低周波振動を、検出アルゴリズム開発におけるシフトぶれ基準波形とする。
- (2) シフトぶれ量と回転角度には強い相関があり、シフトぶれは、主に回転運動で発生している。更に空間上の回転中心を推定すると、カメラの後方数十cmである。

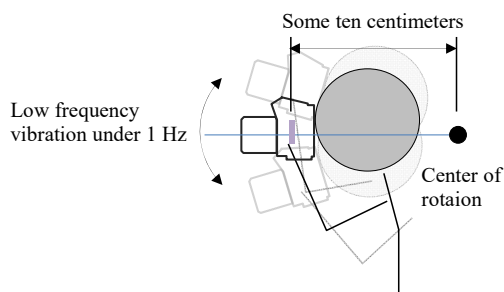


Fig. 5 Schematic diagram of hand shake.

回転中心の推定方法についてFig. 6を用いて説明する。シフトぶれは主に、Fig. 6に示す空間上の回転中心 O を中心とする回転運動で発生すると考察する。

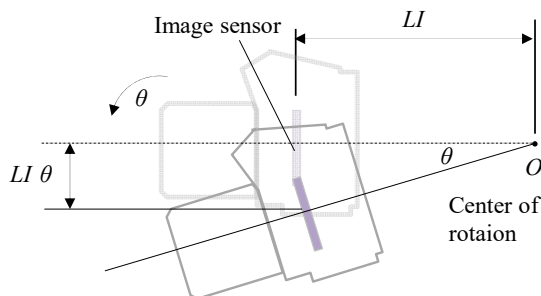


Fig. 6 Motion model of translational blur.

ここで、回転中心 O からカメラのイメージセンサーまでの距離を LI [mm]とすると、シフトぶれ量は $LI\theta$ [mm]で表せる。そこで、 LI に定数を入れて計算しシフトぶれ量[mm]と比較すると、Fig. 7に示すように、ほぼ一致する定数があると分かる。定数は数十[cm]であることから、回転中心はFig. 6に示すように、カメラから後方へ水平方向に数十[cm]延伸した位置にあると推定できる。

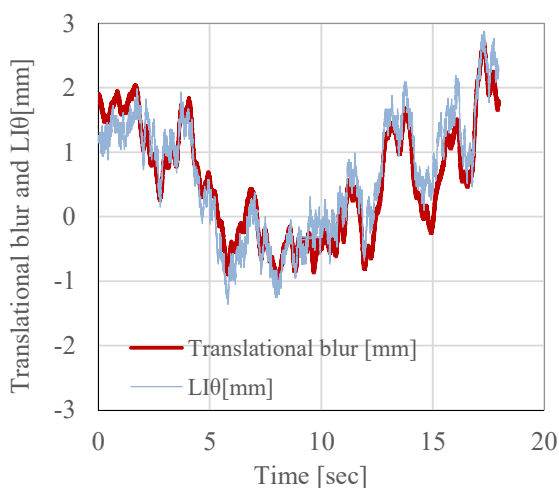


Fig. 7 Comparison between translational blur and $LI\theta$.

2-2-2 重力成分による検出誤差

加速度センサー出力には、シフトぶれによる加速度以外に重力加速度[m/s²]が含まれている。これを

除去することで、正確なシフトぶれ補正が可能となる。Fig. 8に、2-2-1項の実験で得られるシフトぶれ加速度の平均値と重力加速度9.81 [m/s²]を比較するものを示す。Fig. 8より、シフトぶれ加速度は重力加速度に比べて数十分の一と小さいことが分かる。従って、重力成分に埋もれているシフトぶれ成分を高精度に検出することが課題である。

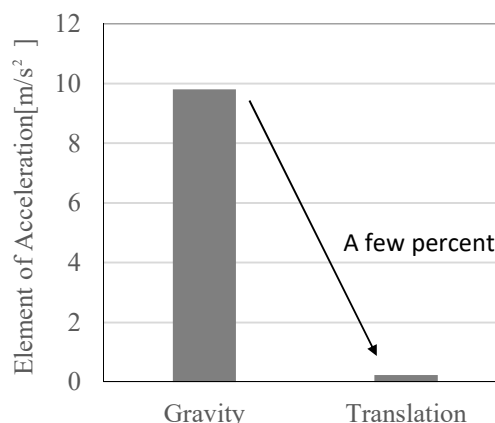


Fig. 8 Component of acceleration sensor output.

2-2-3 イメージセンサーと加速度センサー間距離による推定誤差

本研究では、シフトぶれ補正時に駆動する光学部材としてイメージセンサーを使用する。この場合、イメージセンサーの位置における加速度を正確に求める必要がある。しかしながら、物理的に干渉するため、イメージセンサーと同一箇所への設置はできない。Fig. 9に、カメラ内部の各センサーの配置を示す。

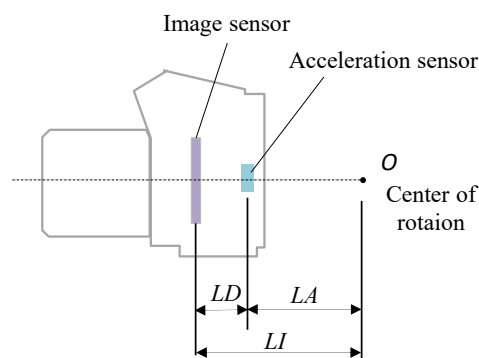


Fig. 9 Layout of each sensor.

空間上の回転中心 O を基準とし、加速度センサーまでの距離を LA [mm]、イメージセンサーまでの距離を LI [mm]、それらの差分を LD [mm]とする。

次に、Fig. 10に、 O 点を回転中心として、 θ [°]回転運動させている様子を示す。

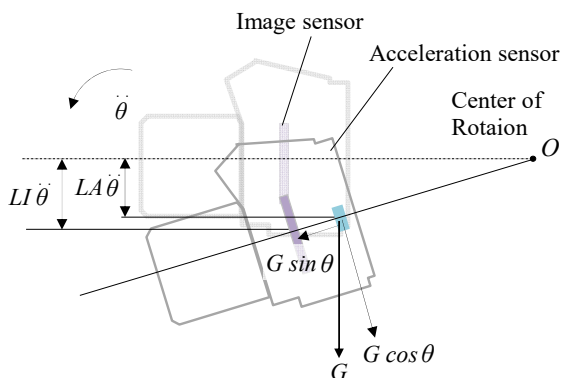


Fig. 10 Statement after θ rotation.

θ [°]の回転運動が起こると加速度センサーには加速度 $LA\ddot{\theta}$ [m/s²]が発生する。一方で、イメージセンサーには $LI\ddot{\theta}$ [m/s²]の加速度が発生し、差異が生じる。この差異による影響を少なくし、イメージセンサーの位置でのシフトぶれ成分を検出することが課題となる。

2-2-4 カメラ姿勢変動による検出誤差

加速度センサー出力に含まれる重力成分は、カメラの姿勢が変わると変化する。例えば、Fig. 10に示すように回転すると、重力成分は $G \rightarrow G \cos \theta$ に変化し加速度センサーの出力は大きく変動する。本研究では、ぶれ補正演算途中でフィルタリングを行っており過渡応答が発生する。過渡応答は、定常状態に収束するまでの非定常状態のことであり、この状態で加速度を変位量へと変換する積分処理を行うと演算誤差が発生する。この過渡応答は、特に、加速度センサー出力が急激に変化する場合に顕著に現れる特性があるため、カメラの姿勢変動で発生する過渡応答に対し、これを抑制し適切に処理することが課題となる。

2-3 シフトぶれ検出誤差低減技術

検出誤差低減技術の開発は、2-2-1項で説明しているシフトぶれ基準波形を活用している。具体的には、基準波形を入力値とするシミュレーターを作成し、2-1項で説明しているシフトぶれ量算出時に発生する3つの代表的な誤差を最小化するアルゴリズムを検討する。基本的に、加速度センサーの出力のみを使用し演算負荷が小さくなるようにしている。以下に概要を説明する。

(1) 重力成分による検出誤差への対応

適切なフィルタリングを行い、重力成分の除去を達成している。このとき、低周波数のシフトぶれ成分と重力成分は帯域が近いいため、フィルタリングが不適切であるとシフトぶれ波形そのものが歪んでしまう。そこで、シフトぶれ基準波形を活用し、良好な補正ができる最適なフィルタ定数を検討し採用している。

(2) イメージセンサーと加速度センサー間距離による推定誤差への対応

カメラ内部の加速度センサーの配置を工夫し、誤差量を最小化している。2-2-3項で説明するように、イメージセンサーの位置における加速度と、加速度センサーに発生する加速度には差異がある。しかしながら、Fig. 9における LD [mm]が十分に小さいか、あるいは LI [mm]が十分に大きければ、 LA [mm] \approx LI [mm]となり誤差の割合は小さくなる。ここで、実験より回転半径は数十[cm]と分かっているので $LI \approx$ 数十[cm]とにおける。本研究では、 LD [mm]を LI [mm]に対し十分に小さくなるようにしている。

(3) カメラ姿勢変動による検出誤差への対応

ユーザーがカメラの姿勢を大きく変える場合を見つげ出す判定処理をアルゴリズムに持たせている。この結果、カメラ自身が自ら判断し、演算誤差が大きくなることを抑制している。

2-4 シフトぶれ補正効果検証

手持ち撮影による補正効果の評価を行う。試験の様子をFig. 11に示す。

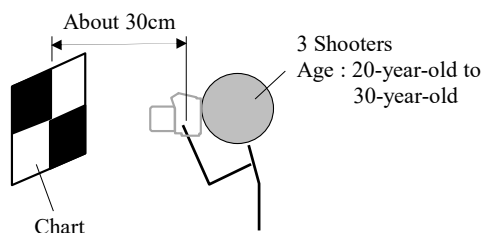


Fig. 11 Test method of performance evaluation.

撮影条件は以下である。

- ・カメラ：開発用デジタル一眼レフカメラ
- ・交換レンズ：PENTAX-DFA MACRO 100mm
- ・評価者：3名 年齢は20代～30代
- ・撮影方法：手持ちファインダー撮影
- ・被写体：ぶれ評価用市松模様チャート
- ・撮影距離：約30cm，撮影倍率0.9倍相当
- ・シャッタースピード：1/15秒，1/8秒の2通り
- ・フォーカス：オートフォーカス
- ・撮影枚数：各シャッタースピードで100枚／名

評価結果をFig. 12に示す。Fig. 12は、シフトぶれ補正On，Offでのぶれ残り量を示す。ぶれ残り量とは、シフトぶれ補正の補正誤差量を表し、値が小さいほど補正効果が高いことを示す。

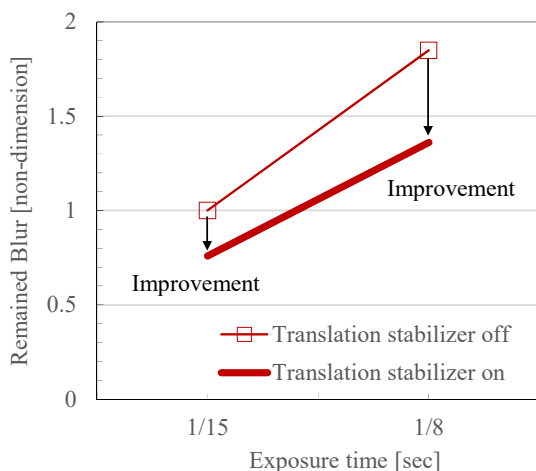


Fig. 12 Stabilization effect evaluated by remained blur.

ぶれ残り量の算出は参考文献³⁾に従い、ぶれ評価用市松模様チャートを撮影し、白黒の境界線が灰色ににじむ量をカウントし求める。Fig. 12は、1/15秒での補正Off状態を1として無次元化しているものを示し、両シャッタースピードにおいて、補正Onで改善効果が得られることが分かる。

次に、ユーザー視点に立ち良像率を算出する。良像率は、良い画像が撮影できる枚数／全撮影枚数、で定義し、値が大きいほど優れていることを示す。良，不良の判定基準は、後述するCIPA補正段数算出時に使用する判定値を用いる。Fig. 13は、シャッタースピード1/15秒でシフトぶれ補正Offの状態を1として無次元化する良像率を示す。

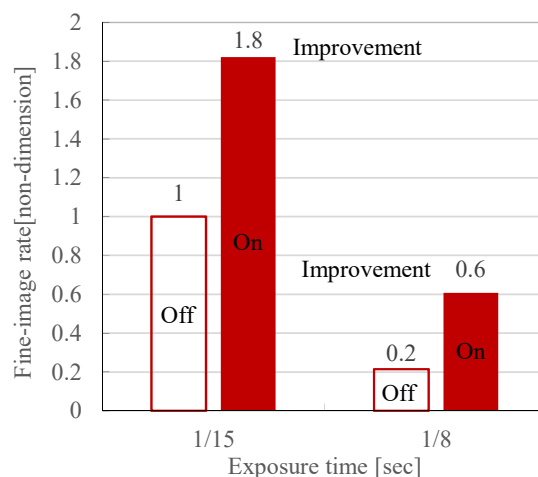


Fig. 13 Fine-image rate comparison between translational stabilization On and Off.

Fig. 13より、開発用デジタル一眼レフカメラにおいて、シフトぶれ補正をOnにすることで、1/15秒では良像率は1.8倍に改善されることが分かる。これは、例えば10枚撮影して良像と呼べる写真が3枚となるものが、1.8倍の5.4枚に増えることを意味する。更に、1/8秒でも3倍に増えており、ユーザーにとって、長秒でも補正効果が得られる技術を構築できている。

本研究では、加速度センサー出力のみを使い補正アルゴリズムを開発し、演算負荷および検出誤差を抑制し、効果的なシフトぶれ補正ができる技術を構築している。

3. 角度ぶれ補正の高精度化

3-1 角度ぶれ検出の課題

本研究では、これまでに手ぶれ補正性能を向上させる技術を開発してきている。しかしながら、手ぶれ補正性能に対するユーザーニーズは高く、更なる向上が望まれている。

現在、手ぶれ補正性能は、CIPA（カメラ映像機器工業会）によるCIPA規格³⁾で定められる方法に基づき測定することとなっている。CIPA規格は、手持ち撮影で特に影響の大きい角度ぶれ（Fig. 1の①、②）に対する評価方法を規定しており、性能は補正段数で表している。この補正段数はシャッタースピード換算の補正段数と等価である。本研究では、これまでの研究で補正段数4段を達成している。そこでここでは、より高精度な5段を達成することを課題とする。

シャッタースピードとぶれ量は比例関係にあり、例えば、手ぶれ補正段数が4段から5段に向上すると、シャッタースピード換算で1 EV長秒側の撮影でも良好なぶれ補正が可能となる。例えば、手ぶれ補正段数4段のカメラで手持ち撮影し、ぶれ補正残りを許容できるレベルがシャッタースピード1/60秒までと判断する場合、補正段数5段のカメラになると、より長秒の1/30秒まで許容レベルの撮影ができるようになる。従って、ユーザー視点で見ても、より長秒で良好な画像を得られるようになり、満足度向上につながる。

3-2 角度ぶれ検出誤差の要因解析

カメラの手ぶれ補正において、角度ぶれ量の検出はジャイロセンサーを用いて行う。角度ぶれ量 θ [°] は、ジャイロセンサーで取得するぶれ角速度を積分することで求める。Fig. 14に、角度ぶれ補正をモデル化して示す。

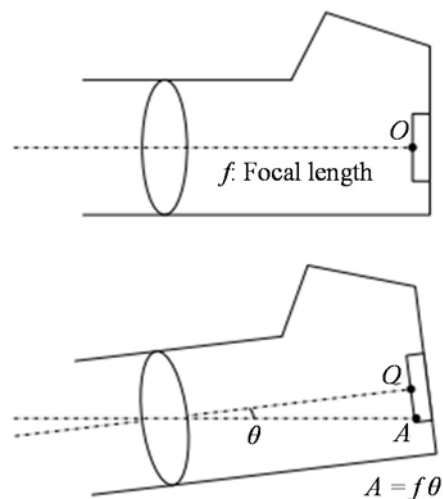


Fig. 14 Vibration of hand shake.

Fig. 14に示すように、角度ぶれ補正量 A [mm] は、角度ぶれ量 θ [°] に、光学系の焦点距離 f [mm] を乗じて算出する。本演算を露光期間中に繰り返し行うことで、連続的に変化する角度ぶれを求めることができる。

本演算において、ジャイロセンサーの角速度出力にはオフセットと呼ぶ誤差が存在し、演算誤差の原因となる。オフセットとは、角速度が0 [deg/s] の状態でも出力が0とはならない基準値ずれのことである。このオフセットはセンサーごとに個体差があり、環境温度でも変動するため固定値で除去することはできない。

Fig. 15に、カメラを正弦波で回転運動させているときのジャイロセンサーの角速度出力を示す。赤色は正しい出力を示し、黄色はオフセットがある状態を示す。Fig. 16は、Fig. 15の角速度出力を積分して角度ぶれ量を求めているものを示す。Fig. 16より、黄色で示すオフセットがあるものは、赤色で示す正しい結果に対して誤差が発生することが分かる。

このように、オフセットが発生し基準値がずれている状態で角度ぶれ量を求めると、誤差が発生し正しい補正ができなくなる。従って、オフセットを除去する処理が必要となる。

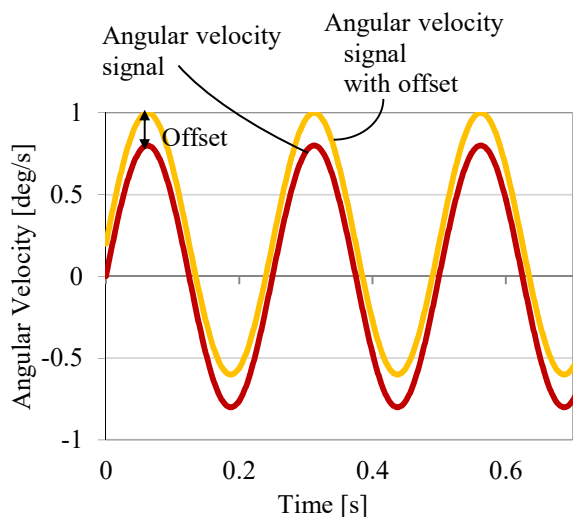


Fig. 15 Angular velocity outputs of a gyro sensor.

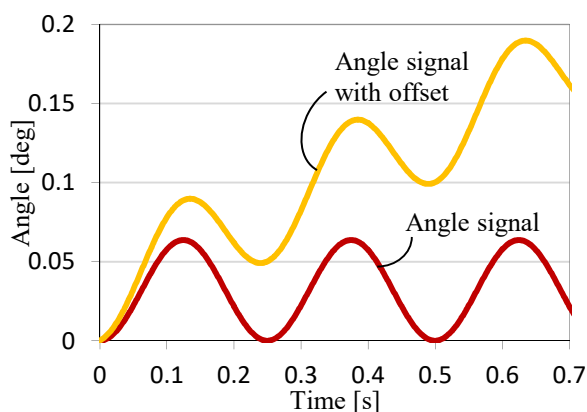


Fig. 16 The integral of the angular velocity outputs.

従来からある手法として、ハイパスフィルタを用いてオフセットを除去する方法がある。しかしながら、ハイパスフィルタは、オフセットを除去する効果を持つ一方で、入力値が急激に変化すると過渡応答を生じ、オフセット以上の誤差量を生じ逆効果となる場合がある。手ぶれ補正においては、パンニング（カメラの向きを変える動作）や、カメラ起動直後の出力の立ち上がり時などで、ジャイロセンサー出力が大きく変動し過渡応答が発生する⁴⁾。

Fig. 17に、パンニングを行っているときのジャイロセンサーの角速度出力を示す。赤色は、生出力を示し、緑色は、これにハイパスフィルタをかけてい

るもの示す。谷状の部分がパンニング動作を行っている期間を示し、パンニング動作終了後の1.5秒付近から過渡応答が発生し、大きな誤差が発生することが分かる。

このように、ハイパスフィルタを単純にかけるだけでは、過渡応答の影響で副作用が発生する。従って、ハイパスフィルタのかけ方を工夫し、オフセットを除去しつつ、副作用を抑制する手法が必要である。

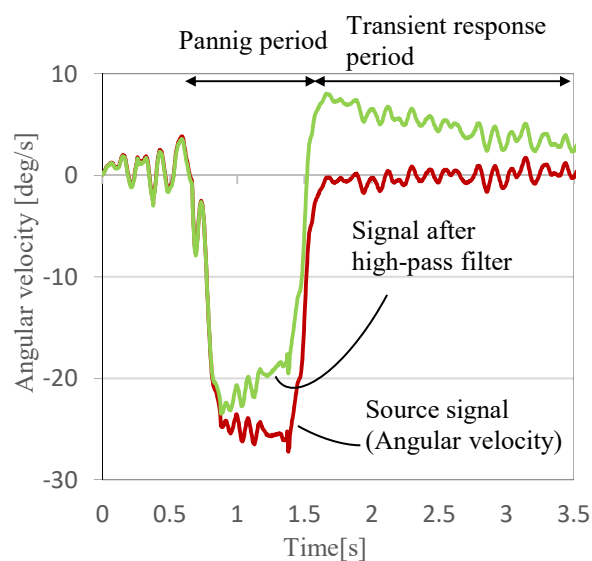


Fig. 17 Transient response of the high-pass filter by panning.

3-3 角度ぶれ検出誤差低減技術

はじめに、現状把握のため、複数の被験者で様々な動作による手持ち撮影を行い、ジャイロセンサーデータを収集する。

次に、手ぶれデータ解析用の専用シミュレーターを構築し、収集データに対して解析し特性を把握する。更に、本シミュレーターを使い、撮影時の様々な動作に対してそれぞれの確な反応になるようにフィルタの最適化を実施する。

これにより、ユーザーの様々な撮影シーンにおいて、オフセットを効果的に除去しつつ、ハイパスフィルタの過渡応答を抑制する処理方法が構築できている。

3-4 角度ぶれ補正技術の効果検証

開発用デジタル一眼レフカメラを使い、本手法と従来手法とで手持ち撮影による比較を行う。評価に使用するレンズは、HD PENTAX-D FA 28-105mm F3.5-5.6 ED DC WRである。レンズ焦点距離は105 mm、撮影距離は5mとする。被写体はぶれ評価用市松模様チャートを使う。本研究では、パンニング動作の影響を確認するため、Fig. 18に示すように、撮影直前に構図を50 cm動かす動作を入れ、静止してから約2秒後に撮影する方法をとっている。

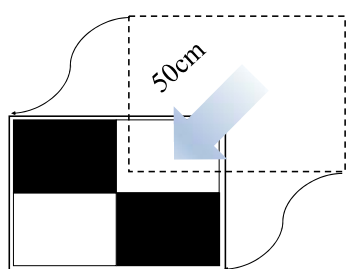


Fig. 18 Method of Panning.

評価者3人で各シャッタースピード50枚ずつ撮影し（各シャッタースピードで計150枚）、2-4項と同様に良像率を算出する。シャッタースピード1/30秒における開発用デジタル一眼レフカメラの良像率を1として無次元化すると、各シャッタースピードにおける良像率は、Fig. 19に示す通りとなる。

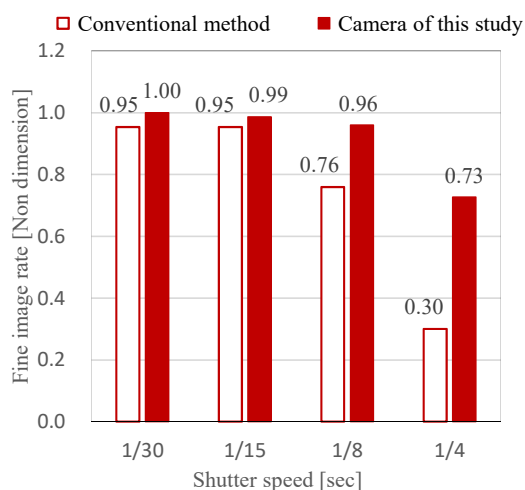


Fig. 19 Fine-image rate comparison between conventional method and camera of this study.

Fig. 19より、全てのシャッタースピードにおいて、本手法の良像率は従来手法を上回り優れていることが分かる。

本カメラを、CIPA規格によって定められている評価方法に基づいて性能評価すると（ $f = 105 \text{ mm}$, HD PENTAX-D FA28-105mm F3.5-5.6 ED DC WRを使用）手ぶれ補正段数5段を達成する。

4. 本技術搭載製品の性能評価

5軸かつ5段補正性能が得られるアルゴリズムを搭載する開発用デジタル一眼レフカメラと、従来製品との補正性能を比較する。従来製品には、シフトぶれ補正が搭載されている市販品3機種を使用し、これらを実評価し平均値を求める。撮影条件は2-6項で説明している内容と同様である。交換レンズは100 mmマクロレンズで統一し、撮影距離は、撮影倍率が0.9倍となるように画像から確認し決定する。

Fig. 20, 21に、各々シャッタースピード1/15秒、1/8秒での良像率比較結果を示す。共に、開発用デジタル一眼レフカメラの良像率を1として無次元化している。

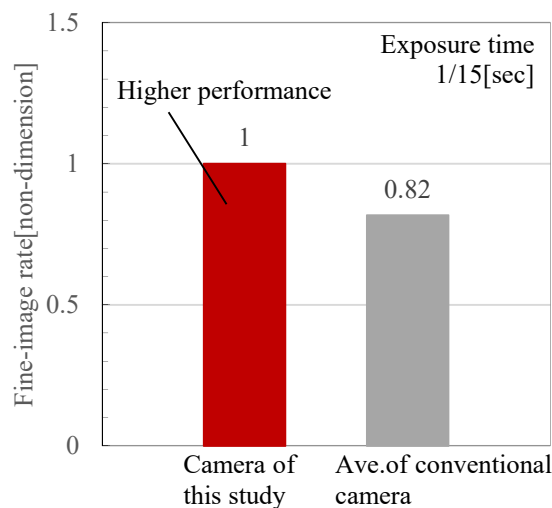


Fig. 20 Fine-image rate comparison between camera of this study and conventional cameras in the exposure time of 1/15 second.

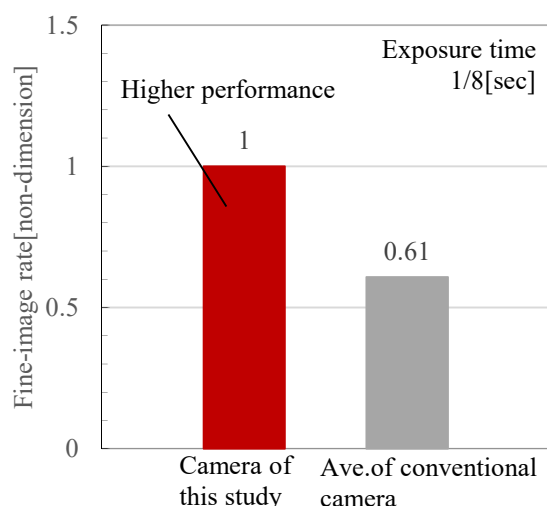


Fig. 21 Fine-image rate comparison between camera of this study and conventional cameras in the exposure time of 1/8 second.

Fig. 20, 21より、開発用デジタル一眼レフカメラは、シャッタースピード1/15秒、1/8秒共に、従来製品の平均値と比べて良像率は高く、良好な補正効果が得られている。

5. まとめ

本研究では、誤差の少ないシフトぶれ検出方法を開発し、5軸補正機能を達成すること、および角度ぶれの検出精度を高め補正性能を向上させることを目的としている。その結果、本目的を達成し、従来製品を超える補正効果が得られている。

プロセス面では、測定環境を構築し手ぶれをモデル化し、シフトぶれの特性を体系的に把握することで、新たな加速度センサーの配置や独自アルゴリズムが開発された。更に、解析シミュレーターを構築することで、シフトぶれおよび角度ぶれ検出誤差低減技術が開発された。これらにより、従来よりも高性能な5軸5段手ぶれ補正が実現できている。これらの技術を今後の性能改善にも活用し、更なる顧客満足度向上へとつなげていきたい。

参考文献

- 1) OM-D E-M5 の開発 (5軸対応手ぶれ補正システムの開発), 日本写真学会誌, Vol. 76, No. 3, pp. 264-267 (2013).
- 2) キヤノン株式会社: 像ぶれ補正装置及びそれを具備する光学機器, 撮像装置, ならびに像ぶれ補正装置の制御方法, 特許5420042 (2013).
- 3) CIPA DC-011-2015 デジタルカメラの手ぶれ補正効果に関する測定方法および表記方法 (光学式).
- 4) ソニー株式会社: カメラのパンチルト判別装置及びカメラ装置, 特許3473105 (2003).