

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360196

研究課題名（和文）力センサの動的校正法・動的誤差補正法の開発

研究課題名（英文）Development of calibration and correction method for dynamic error of force sensor

研究代表者

藤井 雄作 (FUJII YUSAKU)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80357904

研究成果の概要（和文）：

「力センサの動的校正法が存在しない現状」を打開すること目的として、浮上質量法を応用した、実用的な力センサの動的校正・補正法の開発に関する研究を行った。その中で、高精度な動的特性の計測手法を開発し、力センサの出力のみから動的誤差を算出し、補正を行う手法を開発した。そして、力センサの出力と動的補正パラメータを入力することで、力センサの動的誤差の補正を行い、補正結果出力するソフトウェアを開発し、ウェブサイト上で無償で公開した。

研究成果の概要（英文）：

For resolving the lack of dynamic force calibrating method for force transducer, we developed a new measurement and correction method using the levitation mass method. In this research, a high-precision measurement method for dynamic characteristics and a correction method which needs only the output signal of a force transducer and a parameter. We develop a program which corrects the output data of force sensor and open the program on our website for public free of charge.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：精密計測工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：力センサ，動的校正，材料力学，機械材料，精密計

## 1. 研究開始当初の背景

「浮上質量法」(The Levitation Mass Method, The LMM) は、研究代表者が考案・開発してきた、世界的にも類例のない、ユニークな動的力の発生・計測手法である。「浮上質量法」は、浮上支持された慣性質量に作用する慣性力を光波干渉計を利用して高精度に測定することを特徴とする、「変動する

力」の発生・計測手法である。浮上質量法では、実験中に光波干渉計で測定するのは、物体にあてた信号光のドップラーシフト周波数  $f$  のみである。このドップラーシフト周波数  $f$  から、物体の速度  $v$ 、位置  $x$ 、加速度  $a$ 、慣性力  $F$  を数値微分、数値積分などにより求める。これにより、物体の速度  $v$ 、位置  $x$ 、加速度  $a$ 、慣性力  $F$  を高精度に、かつ、完全

に同期したデータとして、測定することができる。

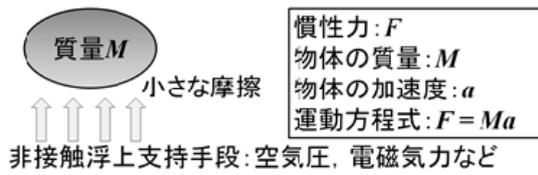


図1 浮上質量法の概略

浮上質量法に関して、これまでに(1)浮上質量法を応用した力センサの動的特性評価法、(2)浮上質量法を応用した材料試験法、生体計測法、(3)浮上質量法を応用したマイクロフォース発生・計測法、(4)浮上質量法の精度向上・機能向上に関する研究を行ってきた。このうち(1)の「力センサの動的特性評価法」として、浮上質量法を応用した数多くのパリエーションを提案し、当該分野では第一人者である。これまで、力センサの動的特性評価法（Impact 応答，Step 応答，Oscillation 応答，慣性質量の影響などの評価法）を、世界に先駆けて開発してきた。しかしながら、それらを統合し、力センサの動的校正法として完成させるまでには至っていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに蓄積してきた技術基盤の上にたち、これまで開発してきた力センサの動的特性評価法を活用して、力センサの動的校正法を開発する。さらに、開発した動的校正法で明らかとなる動的誤差を補正する方法を開発する。最後に、それをソフトウェア化し、実用的な計測システムとして完成させる。ただし、本研究では、力センサがベースに固定して使用される条件（＝通常の使用条件）を対象とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が提案（発明）・開発を進めている「浮上質量法（The Levitation Mass Method）」を活用し、力センサの動的誤差の補正法を開発することを目的とする。以下の3つのテーマに関して研究・開発を進めた。

(1)動的校正法の開発：これまで研究代表者が開発してきた力センサの動的特性評価法（Impact 応答評価法，Step 応答評価法，Oscillation 応答評価法，慣性質量の影響評価法など）を用いて、主要な形式の力センサについて、動的特性評価を行う。また、有限要素法解析（FEM 解析）により、力センサの構造体としての動的特性を解析する。実験と数値解析により得られるセンサ出力の動的特性に基づき、力センサの機械的・電気的な動的応答特性のモデル化を行う。このモデルには、増幅器の特性（フィルタ特性を含む）も

考慮した不確かさ評価式も組み込む。これにより、力センサの動的校正法を開発する。

(2)動的誤差補正法の開発：動的校正法の開発の過程で作成する力センサの動的測定における出力特性モデルから導かれる力センサの動的誤差について、その物理的要因の解明を試みる。物理的要因が解明され、かつ、予測可能なものについて、その成分を補正する手法を開発する。補正後の力センサ出力値（補正波形）の不確かさ評価式も合わせて開発する。

(3)計測評価システムの開発：動的校正・補正法を組み込んだソフトウェアを開発し、実用性の高いシステムとして提案する。このソフトウェアを用いることにより、力センサで測定した「変動する力」の不確かさを知ることができる。力センサの動的校正法が確立されていない現状において、このことは、画期的な成果となる。さらに、このソフトウェアにより、測定値（測定波形）の補正を行うこともできる。

## 4. 研究成果

前述の3テーマについて、それぞれ下記のような研究を行った。

### (1) 動的校正法の開発

これまで用いてきた計数カウンタに変わり、高速デジタイザを用いてドップラー周波数を測定することで、力センサの動的特性をより高精度に測定可能になった。その中で、レーザードップラー速度計の干渉信号から周波数を推定する際に新しい周波数推定手法である Zero-crossing fitting method を開発した。他にも、安価で高精度な動的応答特性の計測が可能な振り子式材料試験機の開発、高速な往復運動の計測を可能とする二重ビート周波数レーザ干渉速度計を開発した。

### (2) 動的誤差補正法の開発

(1)により開発された高精度な動的材料試験機を用い、衝突試験における力センサの誤差の測定を行った。計測結果の解析により、力センサの動的誤差と力センサの感受部の加速度が比例関係になることが明らかになった。有限要素法による解析から、この誤差要因は力センサの感受部の質量による慣性力であることがわかった。加えて、感受部の加速度は、力センサの出力の2階微分と比例関係にあることから、図2に示すように、誤差と力センサ出力の2階微分との関係も比例関係になる。これらの結果から、力センサの出力のみから動的誤差を算出し、補正を行うことが可能であることが明らかになった。一方で、本補正手法では、力の加えられた時間（パルス幅）に応じて補正パラメータが変動する事が明らかになったため、パルス幅に応じて補正係数を変動させる方法を開発した。

補正に用いるパラメータを同一モデルの3個体について計測した所、経年による値の変化や個体間の差がほとんどゼロであることを確認した。加えて、入力された力のピーク値から、その不確かさを推定する式を導出した。

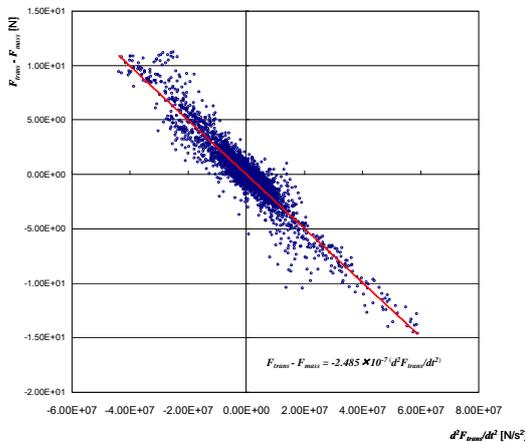


図2 カセンサ出力の2階微分と誤差の関係  
(3)計測評価システムの開発

これまでの研究結果のまとめとして、カセンサの出力と動的補正パラメータを入力することで、カセンサの動的誤差の補正を行い、補正結果、補正前との差、パルス幅、推定される不確かさを出力するソフトウェアを開発し、ウェブサイト上で公開した。図3に開発されたソフトウェアの実行画面を示す。現在は1モデルの補正にしか対応していないが、今後様々な種類のカセンサの動的特性を計測し、対応モデルを順次増やす予定である。

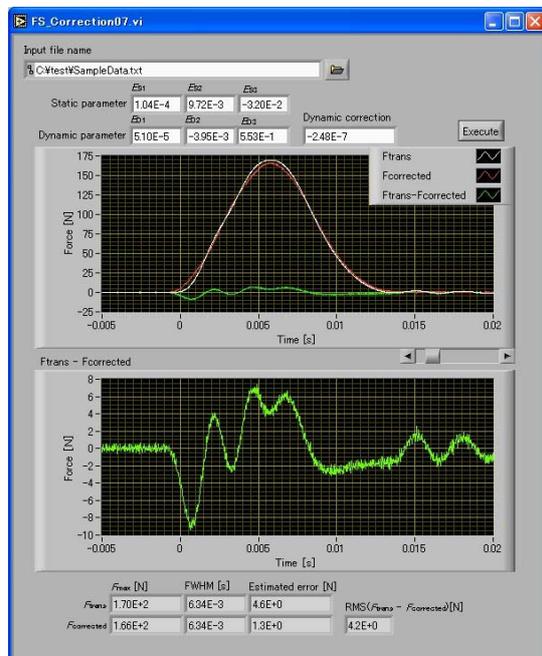


図3 開発されたソフトウェアの実行画面

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 74 件)

① Y. Fujii, K. Maru, T. Jin, P. Yupapin and S. Mitatha, “A method for evaluating dynamical friction in linear ball bearings” Sensors, 査読有, Vol.10, No.11, pp. 10069–10080, 2010.

② Y. Fujii, K. Shimada, K. Maru, J. Ozawa and R. Lu, “A method for direct measurement of the first-order mass moments of human body segments”, Sensors, 査読有, Vol.10, No.10, pp.9155–9162, 2010.

③ Y. Fujii, K. Maru and T. Jin, “Method for evaluating the electrical and mechanical characteristics of a voice coil actuator”, Precision Engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 802–806, 2010. 査読有

④ Y. Fujii, “Toward establishing dynamic calibration method for force transducers”, Measurement, 査読有, Vol.42, No.7, pp.1039–1044, 2010.

⑤ Y. Fujii, “Toward dynamic force calibration” Measurement, 査読有, Vol.42, No.7, pp.1039–1044, 2009.

[学会発表] (計 15 件)

① Y. Fujii, Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM), I-SEEC2011, 2012.2.2, (Nakhon Pathom, Thailand).

② Y. Fujii, Accurate Force Measurement Using Optical Interferometer, International Conference on Physics and Its Application, 2011.11.10. (Bandung, Indonesia).

③ Y. Fujii, Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM), The 3rd International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, 2011.7.18, (Xiangtan, China).

④ Y. Fujii, 31APAMS, Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM), フィリピン大学ディリマン校, 2011.6.16, (ケソン フィリピン).

⑤ I-SEEC 国際会議, Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM), Vinh, Thai hotel, 2010.12.18, (ビンロン ベトナム).

⑥ Y. Ono, K. Maru, M. Murakami, Y. Arai, Y. Fujii, Simulation of space scale in International Space Station, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑦ H. Ebara, K. Maru, T. Yamaguchi, Y. Fujii, Development of precision material tester using a pendulum, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑧ T. Sakai, K. Maru, T. Yamaguchi, Y. Fujii, Development of self-correction software of force transducer dynamic error, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑨ T. Yamaguchi, Y. Fujii, T. Kanai, K. Nagai, S. Maruyama, Numerical Simulation of Impact Responses for an Elastic Structure with a viscoelastic spring Including Nonlinear Hysteresis Damping, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑩ Y. Fujii, K. Maru, K. Shimada, Space balance and space scale : mass measurement devices, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑪ Y. Fujii, K. Maru, T. Yamaguchi, Precision force measurement using the Levitation Mass Method (LMM), International Conference on Precision Instrumentation and Measurement 2010, 2010.3.18, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑫ J. Ozawa, K. Maru, Y. Fujii, Microforce material tester using small pendulum, 1st International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2009.12.11, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑬ K. Maru, W. Khunnam, R. -S. Lu, P. Yupapin, Y. Fujii, Tilt mechanism for precision control of down-slope component of gravitational force for micro force generation, 1st International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2009.12.11, 桐生市文化会館 (群馬県).

⑭ 丸浩一, 藤井雄作, 浮上質量法を用いた高精度曲げ評価装置とその小型化, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009.4.1, 筑波大学(茨城県).

⑮ 山本亮, 藤井雄作, 丸浩一, 長井教博, 嶋田和人, 微小重力環境下で使用する体重測定器, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009.3.30, 筑波大学(茨城県).

[図書] (計 1 件)

① 藤井雄作, “浮上質量法 : 光波干渉計を利用した力学量の精密計測法”, 光アライアンス (日本工業出版), Vol.20, No.10, pp.30-34, 2009.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

①名称 : 光波干渉計  
発明者 : 藤井雄作  
権利者 : 特定非営利活動法人 e 自警ネットワーク研究会  
種類 : 特許  
番号 : 特願 2010-276577  
出願年月日 : 2010.12.13  
国内外の別 : 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~fujii/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 雄作 (YUSAKU FUJII)  
群馬大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 8 0 3 5 7 9 0 4

### (2) 研究分担者

山口 誉夫 (YAMAGUCHI TAKAO)  
群馬大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 9 0 3 2 3 3 2 8

丸 浩一 (MARU KOUICHI)  
香川大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 0 0 5 3 0 1 6 4

田北 啓洋 (TAKITA AKIHIRO)  
群馬大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：20432768

(3) 連携研究者