

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04328

研究課題名（和文）MEMS加速度・ジャイロセンサを用いた地震被害計測センサの開発

研究課題名（英文）Development of a tilting sensor for estimating a structural damage due to a large earthquake

研究代表者

佐伯 昌之（SAEKI, Masayuki）

東京理科大学・理工学部土木工学科・教授

研究者番号：70385516

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、地震時の構造物の定量的な被害把握を最終目的として、MEMS加速度・ジャイロセンサを用いた安価な動的傾斜センサを開発するものである。本研究では、入手が容易な市販のMEMS加速度・ジャイロセンサを選定し、試作機を製作した。そして、小型の2軸振動実験を行い、実際の地震時に計測されるであろう傾斜による加速度および角速度の波形を多数計測した。ただし、この振動実験では地震動による加速度は再現できないので、地震動をノイズとして追加した。そして、ロボット制御などで使用される姿勢推定アルゴリズムを適用し、地震時ならではの条件を考慮して、姿勢を推定した。その結果、約0.1度の精度を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、地震直後の被災度把握は、計測震度などの揺れの強さ指標か、目視検査により行われていた。前者は、ある地域の揺れの強さは分かるが、個別の構造物の被災度は把握できない。後者は、個別の構造物の被災度は把握できるが、地震の規模と比例して調査時間を要する。本研究では、安価な動的傾斜センサを開発したことから、感震プレーカー等への導入が進めば、構造物の迅速な被災度把握に貢献できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to develop an affordable tilting sensor for estimating a structural damage due to a large earthquake. In this research, a prototype sensor was developed using a commercially available MEMS accelerometer and gyroscope. Two-axial vibration experiments were conducted for evaluating the accuracy. This experiment was able to reproduce the tilting response of sensor in case of a large earthquake. However, the acceleration response due to earthquake was not reproduced because of the small size of vibration table. So, the acceleration response due to earthquake was added to the measured acceleration data as a noise. The attitude estimation algorithm, which was developed in a research field of robotics, was applied to the 6 axial-measurement data. Because the acceleration response was relatively larger and longer than that of usual robot motion, the algorithm was modified to decrease the effect of noise. As a result, 0.1 degree accuracy was achieved.

研究分野：構造工学，地震工学

キーワード：被災度把握 地震応答 MEMS加速度 MEMSジャイロ 層間変形角

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大震災時に被害状況を迅速に把握することは、2次災害の防止、緊急・救急車両の効率的な運用、支援物資の適切な輸送など、減災の観点から重要な課題となっている。また、近年では比較的大きな余震を伴う地震も観測されており、震災後の被害拡大モニタリングも重要なテーマとして意識されつつある。

本研究では、震災後の建造物の被害把握に着目した。例えば、地震後に自宅に待機すべきか、それとも避難所に退避すべきか、という問題については、被災者は専門的知見を持たないまま自己で判断するしかない。避難すべきにもかかわらず住民が居続ければ被害が拡大する可能性があるし、避難しなくても良い家屋の住民が避難すると、それだけ避難所の環境が悪化するし、心理的負担も大きい。そのため、最終的には各個人が判断するとしても、家屋の被災度をある程度定量的に示すことができれば、有益であると思われる。また、家屋などで計測された建造物の被災情報を、近年の発達が目覚ましい IoT 技術により瞬時に集約することができれば、地域全体の被災度の把握がより正確となり、緊急・救急車両の効率的な運用や、支援物資の適切な輸送にも有益である。

ここで重要となるのが、各建造物の被災度という情報をどのように生成するか、という問題である。例えば、既往の研究では、被災度を評価するための被害関数が提案されている。地盤に固定された地震計で記録された波形から最大加速度、最大速度、SI 値などの地震の強さに関する指標を計算し、実際の被災地域で調査された建造物の被害率との相関が調べられている。このような研究の問題点は、ある地域の平均的な被災度は予想できても、それぞれの建物の被災状況は把握できないことである。それは、建造物が壊れたかどうかは、地震の強さだけでなく、建物の強さにも依存するからである。

建造物がどの程度変形したかを調べる指標として、層間変形角がある。震災後に専門家などで構成される判定士が行う応急危険度判定では、建造物の外観などを見て危険度を判定するが、その際、建造物の傾斜角を計測する。この傾斜角が層間変形角であり、建物の被害状況を表す定量的な指標になる。そのため、全ての建造物に設置できるほど安価なセンサを開発し、これにより層間変形角を自動的に計測することができれば、各建造物の被害を迅速に知ることができる。さらに、この指標データを IoT 技術(無線センサネットワーク)で集約すれば、被害の全体像までも迅速に把握でき、大変に有益であると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震後に各建造物の被害状況を迅速に把握するための安価なセンサを開発することである。より具体的に言えば、市場に流通している入手が容易で安価な MEMS 加速度・ジャイロセンサを用い、動的に姿勢を推定可能なセンサを開発することである。これにより、地震時の建造物の最大および残留層間変形角を計測できるようにすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、上述の目的を達成するために、以下の5つの項目について研究開発を行うこととしていた。

(1) 市販されている様々な MEMS 加速度・ジャイロセンサを網羅的に調べ、幾つかの地震センサを試作し、振動実験により性能を相互に比較する。

(2) MEMS 加速度・ジャイロセンサから計測された加速度・角速度のデータから層間変形角を精度よく推定するアルゴリズムを開発する。応急危険度判定では、木造建築物の傾斜 1/60 を小破と定義していることから、本研究では、その 1/10 である 1/600 [rad] (0.1 [deg]) を目標とする。

(3) 上記センサの試作機および推定アルゴリズムを、市販されている無線センサネットワークに実装する。そして、層間変形角推定アルゴリズムをセンサに実装し、振動実験により、層間変形角が精度よく推定できるかを確認する。

(4) 生活ノイズにより無線センサが頻繁に反応すると電力消費が激しくなることから、生活ノイズには反応しないが、ある程度以上の地震動には反応する計測トリガのアルゴリズムを開発する。

(5) 建造物に設置された加速度計で計測される応答波形から最大加速度や SI 値などの地震の強さと関連する指標を計算し、指標としての有効性を検証する。この項目は、本研究の主旨と反するが、研究のバックアップとして、本研究と並行して行う。

4. 研究成果

上記の研究方法と対比して研究成果を記載する。

(1) 本研究では、市販されている MEMS 加速度・ジャイロセンサを2度にわたり網羅的に調べ、2タイプの試作機を作製した。初号機は、6軸のパッケージで高精度・低消費電力のものが無か

ったことから、MEMS 加速度センサおよび MEMS ジャイロセンサを使用して試作機を作製したが 2 号機を作製する際には 6 軸センサが流通しており、センサの性能・安定性も格段に向上していた。

この試作機を用い 2 軸振動実験を行った。伸縮・傾斜可能な棒の上端を静止したフレームにピン結合し、棒の下端は 2 軸振動台の振動テーブルにピン結合した。そして、センサは伸縮・傾斜可能な棒の上端に固定した。気象庁のホームページからダウンロードした地震波形（加速度波形）を用いて、1 自由度モデルの構造応答（相対変位応答）を計算し、振動テーブルに入力した。これにより、実際の地震時の動的な傾斜角を再現できる。この時の加速度および角速度を試作機で計測した。ただし、この 2 軸振動台は小型のため、振動のストロークが短く、傾斜は再現できても加速度の強さは再現できない。そこで、計測した加速度データに、構造応答の加速度を足すことで、地震時の計測データを再現した。この振動実験は、加速度の大きさ、継続時間などを考慮して、様々なデータが含まれるよう、東日本太平洋沖地震、熊本地震、大阪地震のものを用いた。

(2) MEMS 加速度・ジャイロセンサによる応答からセンサの姿勢を求める問題は、機械工学の分野で、ロボットやドローンの姿勢制御などを目的として行われていた。その様な研究では、角速度を時間積分して姿勢を求める状態方程式と、ある姿勢で静止した加速度センサが計測する重力の分力を表す観測方程式を用い、これ等をカルマンフィルタで解いている。本研究でもこのアルゴリズムを援用した。ただし、ロボット等と異なり、地震応答の場合は加速度の最大値が 1 G を大きく超え、継続時間も長い。これは上記のアルゴリズムにとって非常に不利な条件となっている。一方で、構造物の被災度を把握するという目的に限定すれば、地震時のセンサの回転角は非常に小さいと言える。この様に、地震時に特化した条件をアルゴリズムに導入することで、ノイズの不利を解消することとした。

上記のアルゴリズムを基に姿勢推定プログラムを開発し、振動実験データを解析し、姿勢角の推定精度を検証した。それによると、最大層間変形角、残留層間変形角とも多くの地震波形で 0.1 度の精度が達成できた。まだ一部の波形で 0.1 度を若干超えるケースも見られるが、そもそも 1 度以上傾斜する場合であり、被災度判定としては問題ないと考えている。

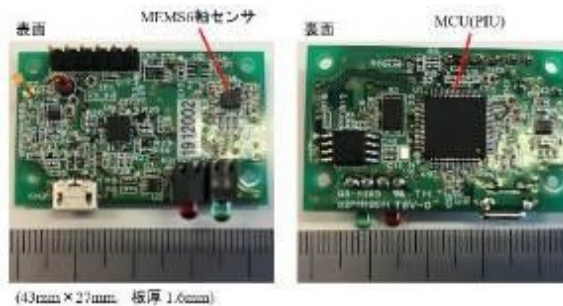
(3) 当初、上記アルゴリズムをセンサに実装することを予定していたが、現状では、まだ取り組んでいない。将来的には実装を試みるが、現時点では、さらなる精度向上を優先している。

(4) 当初、消費電力を気にして地震動と生活ノイズを区別する方法を検討していたが、新しく試作した 2 号機の消費電力が極めて小さいこと、感震ブレーカー等ではある程度の電力供給が確保できること、通電の切り替えは計測データの安定性を低下させることから、現状は通電し続ける方法を想定している。そのため、この研究項目については、検討を打ち切った。

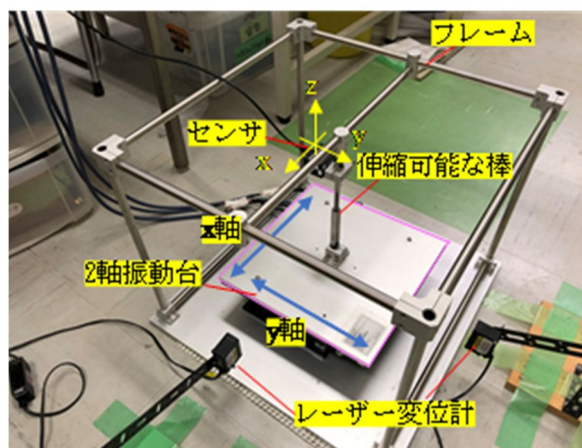
(5) 上記研究のバックアップとして、構造応答から地震動指標を計算する方法を検討した。本来、計測震度などの地震応答は、地表面に設置された専用の地震計の記録を用いて計算する。この方法は、精度は確保されるものの、予算や設置許諾の問題から、空間密度を向上させることは難しい。そこで、上記で開発したセンサ等の様に、民間の構造物に固定されたセンサで計測される加速度応答から計測震度などを推定する手法を検討した。ただし、構造応答の場合は構造物の振動特性のために、計測データが歪められている。

本研究では、地震応答から構造物の固有振動数と減衰比を同定し、構造物を 1 自由度モデルと仮定して伝達関数を計算し、この伝達関数を用いて構造物の影響をデコンボリューションすることで、地表面加速度を推定する方法を検討した。実際に推定された地表面加速度の波形は、元波形とは異なるものの、計測震度や SI 値を計算すると、値はまずまずの一致を示した。今後、継続して、2 自由度モデルの場合などを検討する予定である。

さらに、構造部材が地震時に破壊される音を検知する技術についても検討した。将来的には、構造物の層間変形角、地震動強さ指標、構造部材破壊音など、多様な指標を総合することで、より的確に構造物の被害把握ができるようになるものと思われる。



試作したセンサの表と裏



2 軸振動実験の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 HAIBARA, Naomasa and SAEKI, Masayuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Development of an anomaly detection system of road signs using mems accelerometers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th international Conference on Civil and Building Engineering Informatics	6. 最初と最後の頁 361-366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 IZUMITA, Takeo and SAEKI, Masayuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Basic study on detecting breaking sounds of structural members by using machine learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 4th international Conference on Civil and Building Engineering Informatics	6. 最初と最後の頁 49-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 IZUMITA Takeo, SAEKI Masayuki	4. 巻 75
2. 論文標題 BASIC STUDY ON A DETECTION METHOD FOR BREAKING SOUNDS OF STRUCTURAL MEMBERS BY USING MACHINE LEARNING	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_613 ~ I_622
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejam.75.2_I_613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 ISHIGURO Hiromichi, SAEKI Masayuki	4. 巻 74
2. 論文標題 ESTIMATION OF STORY DEFORMATION ANGLE USING A MEMS ACCELERATION & GYRO SENSOR	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_571 ~ I_578
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejam.74.I_571	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和泉田健夫, 佐伯昌之
2. 発表標題 構造部材破壊音判定におけるNNとSVMの比較
3. 学会等名 土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤駿, 佐伯昌之
2. 発表標題 構造応答から計算されるSI値の特性評価と振動特性の算出
3. 学会等名 土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和泉田健夫, 佐伯昌之
2. 発表標題 機械学習を用いた構造部材破壊音検出のための基礎的検討
3. 学会等名 土木学会・第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石黒広倫・佐伯昌之
2. 発表標題 MEMS加速度・ジャイロセンサを用いた層間変形角の推定
3. 学会等名 土木学会第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石黒広倫・佐伯昌之
2. 発表標題 MEMS 6軸地震センサによる層間変形角の推定と誤差モデルの検証
3. 学会等名 平成30年度 土木学会全国大会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和泉田健夫・佐伯昌之
2. 発表標題 構造部材の破壊音検出のための基礎的検討
3. 学会等名 平成30年度 土木学会全国大会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------