

2. 建物の並進およびねじれ振動を対象とした小型慣性計測ユニットの振動計測性能の確認

Verification of Vibration Measurement Performance of the Compact Inertial Measurement Unit for Translational and Torsional Vibrations of Buildings

老藤 慎也*1 森 浩二*1 飛田 喜則*2 山内 豊英*1 宮原 直樹*3

要 旨

ドローンの姿勢制御や位置推定などに用いられている小型の慣性計測ユニット (IMU) について、従来用いられていなかった建物の振動計測への適用性を確認することを目的として、鉄骨造建物において加振実験および振動計測を行った。その計測結果を用いて、建物の並進振動における加速度、および、建物のねじれ振動における角速度について、同時に計測を行ったサーボ型速度計との比較を行い、建物加振時および常時微動時における IMU の振動計測性能を確認した。対象とした IMU では、加速度計測において卓越振動数およびスペクトル振幅を正確に計測できたが、角速度計測においては、建物加振による応答振幅が十分でなかったため、適切な計測ができるかについて課題が残った。

キーワード：振動計測／慣性計測ユニット／加速度／角速度／自己雑音レベル

1. はじめに

近年、構造ヘルスマニタリングなどを目的として、MEMS 技術を使った様々な小型センサーが用いられている。建物の振動特性を把握する目的では、建物の短辺・長辺方向に並進する振動の他に、建物の鉛直軸を中心とした各階のねじれ振動が計測の対象とされている。このねじれ振動の計測には、各階の重心あるいは剛心に対して対称に配置された2つの加速度センサーを用いている。

この建物のねじれ振動の計測を含めた、より簡便な建物振動の計測方法の実現に向けて、宇宙航空など様々な分野で用いられている慣性計測ユニット (以後、IMU と称する) に着目した。この IMU は、3 次元の慣性運動を検出する装置で、直交 3 軸の並進運動 (加速度) および回転運動 (角速度) を同時に計測できるため、建物各階に IMU を 1 基設置することで、当該階の並進振動およびねじれ振動の計測を可能とすることが期待できる。(図-1)

この慣性計測ユニット (IMU) を建物振動の計測に用いるにあたり、設置の簡便さから、MEMS 技術を用いて小型化された計測ボードに着目した。通常、IMU の利用が想定される姿勢制御等と本報で対象とする建物振動計測とは、異なる周波数特性と振幅となるため、鉄骨造 2 階建て建物を対象として、起振機等を用いた加振実験を行い、その計測結果に基づいて、小型慣性計測ユニットの建物振動計測への適用性を検証した結果を報告する。

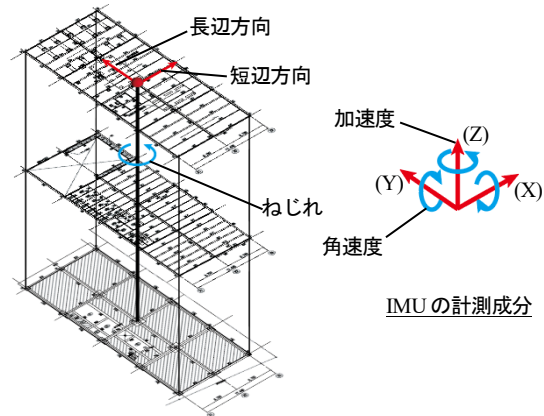
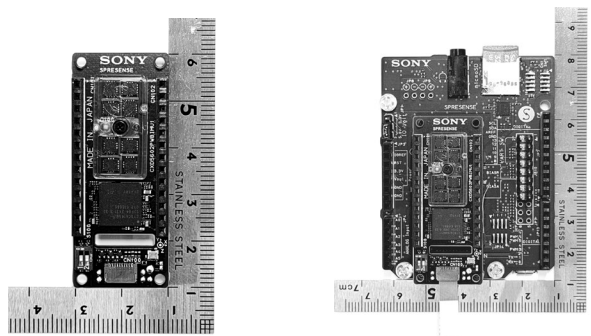


図-1 建物振動と慣性計測ユニット (IMU)



小型計測ボード

IMU 計測装置

写真-1 小型計測ボードと IMU 計測装置

2. 小型計測ボード

振動計測に用いた小型の計測ボード (ソニーセミコンダクタソリューションズ社製) を写真-1 に示す。

*1 技術研究所建築構造研究グループ *2 技術研究所建築構造研究グループ 兼 GCD グループ
*3 大阪本店設計部構造グループ 兼 技術研究所建築構造研究グループ

本計測ボードは、ドリフトなどのジャイロセンサー特有の課題を解消し、微小な回転成分の計測から自動運転等の姿勢制御にも用いられている慣性計測ユニットであり、それらの機能が50mm×21mmのプリント基板に集積されている。計測データは、直交3軸の加速度および角速度センサーの計測値が、温度補正等の処理をされたデジタルデータとして出力されるため、収録機能を有したIoT用ボードコンピュータ Spresense に接続することで、単体で計測および収録のできる計測装置とした。

計測ボードとしての製品仕様を表-1に示す。本計測ボードは、低バイアス性能および低ノイズ密度の実現が可能とされており、同製品2枚を重ねることでノイズ性能を向上させることが可能となる設計であるため、今回の計測では、2枚を重ねて使用することとした。

本計測ボードで想定されている用途では、本体が移動する環境で加速度および角速度が継続的に大きく変化する状況を想定されているため、常時微動を含めた建物振動の計測に用いられた事例は、確認できなかった。

3. 振動計測

3.1 対象建物の概要

振動計測の対象とした建物は、鉄骨造2階建てのラーメン構造である。建物の屋上階平面図を図-2に示す。平面形状は、長辺方向約45mの4スパン、短辺方向約17mの2スパンの整形であるが、2階の東側端部1スパンが吹き抜けとなっているため、屋上階の剛心が西側へ偏っていることが想定される。高さ方向は、軒高さ約9.7mであり、略算式による固有振動数(周期)は、約3.4Hz(0.29秒)である。また、1・2階には、短辺・長辺両方向に付加制振構造のオイルダンパーが設置されている。

3.2 計測計画

振動計測には、IMU収録装置の他に、従来より建物振動の計測に用いられている、1軸サーボ型速度計による加速度センサー(以降、SPCと称する)を用いた。

各センサーは、図-2に示す対象建物の屋上階に配置し、建物の短辺方向がセンサーのX方向、長辺方向がY方向、鉛直方向がZ方向となるよう設置した。(写真-2)

6軸センサーのIMUは、平面中央部に配置し、屋上階全体の並進振動およびねじれ振動を計測できるようにした。なお、異なる振幅に対する計測状況を確認するために、1・2階の中央部にも同様に設置している。

1軸センサーのSPCは、屋上階の加速度および角速度についてIMUと比較することを目的として、平面中央部および短辺方向端部、長辺方向の中間スパンに配置した。

表-1 計測ボードの製品仕様(2枚重ね時)

	加速度	角速度
ダイナミックレンジ	16,8,4,2G	4000,2000,1000 500,250,125dps
ノイズ密度	9.8 μG/√Hz 9.61×10 ⁻⁵ m/s ² /√Hz	0.7 mdps/√Hz 1.22×10 ⁻⁸ rad/s/√Hz
バイアス安定性	3.13 μG 3.07×10 ⁻⁵ m/s ²	0.27 dph 1.31×10 ⁻⁶ rad/s

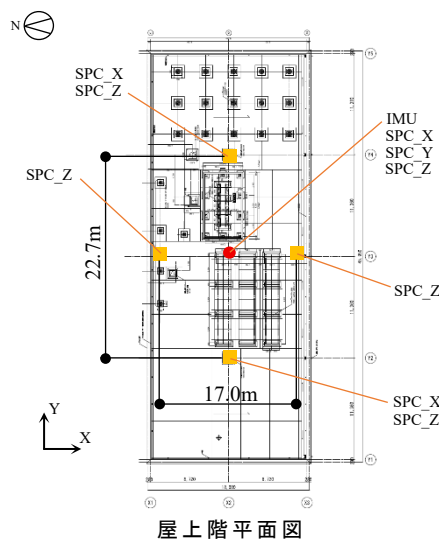


図-2 対象建物とセンサー配置

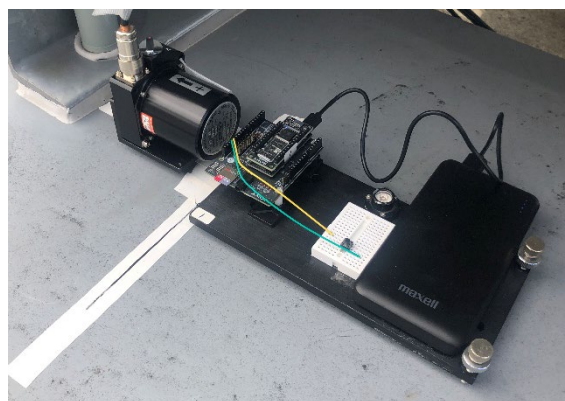


写真-2 センサー設置状況



写真-3 起振機

3.3 収録条件

サンプリング周波数は、IMU では、高サンプリング周波数による影響を確認するため、計測ボードの仕様上限である 1920Hz の設定とし、SPC では、通常用いられている 200Hz とした。ただし、計測に用いた IMU の収録データでは、時間間隔に揺らぎが存在することが確認されているため、比較分析の際はデータの取り扱いに配慮が必要となっている。

3.4 加振実験

加振実験では、2 基の起振機 (1 基あたり加振力 490N) を用い、建物平面の中心に対して対称となるよう、屋上階の起振機用設備基礎に設置した (写真-3)。建物の短辺方向 (X) 加振および長辺方向 (Y) 加振では、起振機の向きを変更し、2 基の起振機を同方向・同位相に加振させる計画とした。また、建物のねじれ振動加振では、短辺方向に設置した 2 基の起振機を逆位相に加振させることで、建物に Z 軸周りの回転振動が生じるようにした。

計測ケースを表-2 に示す。建物加振は、まず始めに、各計測ケース毎に、20Hz から 2Hz まで 6 分間で行うスイープ加振を加振加速度 0.5G で行い、建物の卓越振動数を調査した。さらに、加振振動数の範囲を絞った 6Hz から 2Hz まで 3 分間で行うスイープ加振を加振加速度 0.7G で行った後に、各加振方向の卓越振動数による定常加振を加振加速度 1.0G で行った。また、屋上階における短辺方向への人力加振についても併せて行った。

4. 計測後処理

4.1 サンプリング周波数の統一

異なるサンプリング周波数とした IMU および SPC について、周波数領域等で比較する際に同一の計算条件となるよう、計測データのサンプリング周波数を統一することとした。計測に用いた IMU の収録データは、時間間隔に揺らぎを含んだ約 1920Hz であるため、統一するサンプリング周波数を 2000Hz とし、等間隔時刻歴データへのリサンプリング (線形補間) を行った。

IMU の計測結果におけるリサンプリングの周波数特性への影響については、建物の振動特性を把握する上では問題ないことを確認している。なお、統一するサンプリング周波数は、SPC の計測時のサンプリング周波数に対して整数倍となるため、SPC においてはリサンプリング (線形補間) 後も計測時の値が保持されている。

4.2 時刻同期処理

本計測では、SPC と時刻補正機能を有していない IMU 計測装置とを比較するため、振動計測後に計測データ上

表-2 計測ケース

計測ケース	加振方法		収録時間 (sec.)
Day 1			
常時微動			3600
短辺 (X) 並進	スイープA	0.5G (20~2Hz) 6min.	200
	スイープB	0.7G (6~2Hz) 3min.	200
	正弦波	1.0G (3.38Hz)	200
短辺 (X) 逆位相	スイープA	0.5G (20~2Hz) 6min.	360
	スイープB	0.7G (6~2Hz) 3min.	200
	正弦波	1.0G (4.93Hz)	190
長辺 (Y) 並進	スイープA	0.5G (20~2Hz) 6min.	400
	スイープB	0.7G (6~2Hz) 3min.	200
	正弦波	1.0G (4.04Hz)	230
Day 2			
短辺 (X) 並進	スイープ	0.7G (6~2Hz) 3min.	200
	正弦波	1.0G (3.28Hz)	230
長辺 (Y) 並進	スイープ	0.7G (6~2Hz) 3min.	250
	正弦波	1.0G (4.09Hz) 3min.	230
常時微動			3600
短辺 (X) 並進	人力加振	30回 (3.28Hz)	200
	人力加振	30回 (3.28Hz)	100
	人力加振	30回 (3.28Hz)	200

で時刻同期処理を行うこととした。同期処理は、同位置に置いた IMU および SPC に対して各計測の開始時に衝撃波を与え、その計測波形を基準とした相互相関の計算により時刻ズレを算出し、それに基づいた時刻補正により時刻同期を図った。なお、後述の角速度算出において、IMU による加速度計測データを用いないため、位相差スペクトルの低振動数領域における勾配に基づいた高精度の時刻同期処理は不要と判断した。

4.3 角速度の算出

本計測では、IMU の角速度計測結果と比較するために、SPC の加速度計測結果から角速度を算出することとした。その算出方法は、対となる 2 つの SPC センサーの加速度計測結果と、図-2 に示す測定位置間の距離を用いて角加速度を算出し、初期値 0 として角速度へ積分することとした。なお、SPC は各センサーが同一の収録機で計測されていることから、計測時より各センサー間の時刻同期がされており、角速度の算出過程で計測データ上の回転軸の移動や位相差が生じることはないと考えられる。

4.4 周波数解析の手法

加速度および角速度の時刻歴データを周波数解析する手法として、FFT 処理を短い区間でオーバーラップさせながら収録時間全体で行い、そのフーリエ振幅スペクトルを平均化した区間平均スペクトル解析を採用した。その解析による出力は、収録時間 (解析区間) の長さには寄らずに周波数成分の量を比較できるように、振幅スペクトル密度 (ASD) とした。なお、図化する際の平滑化処理は、比較するデータの解析区間の長さには寄らずに同一の滑らかさとなるよう、窓関数を適切に調整することとした。

5. 計測結果

5.1 加速度の比較

IMU および SPC の加速度計測結果について、時刻歴波形および振幅スペクトル密度 (ASD) を図-3 に示す。

(a) 常時微動時では、短辺方向 (X) 3.418Hz および長辺方向 (Y) 4.139Hz で卓越振動数およびスペクトル振幅が一致している。鉛直方向 (Z) では卓越している成分は確認できないものの、6Hz より大きい範囲で周波数成分の分布が同じ傾向にある。

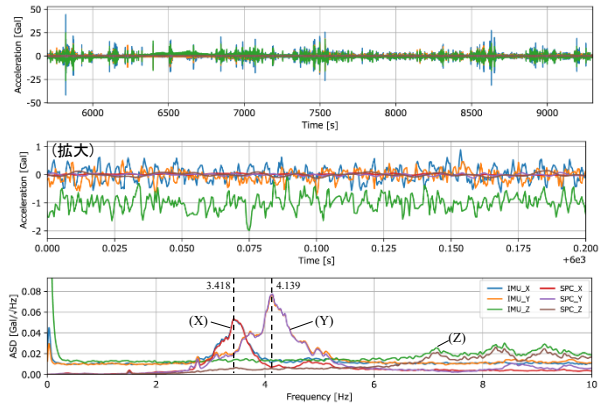
(b) 短辺方向 (X) 並進スイープ加振時では、3.319Hz で卓越振動数およびスペクトル振幅が一致している。

加速度計測結果における IMU および SPC の自己雑音レベルについて、振幅スペクトル密度 (ASD) を図-4 に示す。これは、図-3 の卓越した成分を含まない範囲を拡大したものである。なお、ここでの自己雑音とは、計測振動以外の、センサーの物理的・電気的性質によって生じているノイズのことである。図-4 より、IMU および SPC では、建物加振の有無や加振方向に関わらず、それぞれ同程度の自己雑音レベルであることを確認した。

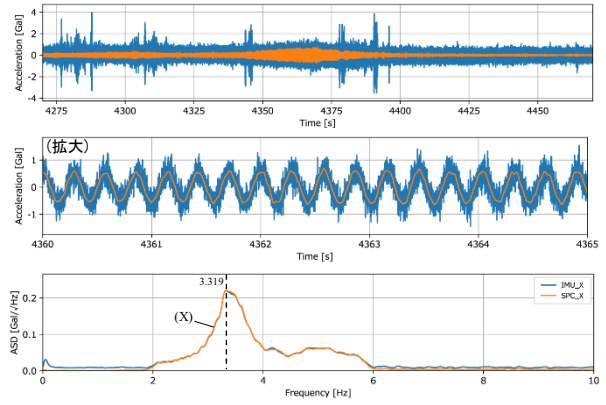
5.2 角速度の比較

IMU の角速度計測結果、および、SPC の加速度計測結果に基づく角速度算出結果について、常時微動時の時刻歴波形および振幅スペクトル密度 (ASD) を図-5 に示す。SPC の算出結果に対しては、積分時に生じるドリフトを除去するためにハイパス・フィルターを掛けている。

SPC の Z 軸回転成分における卓越振動数 3.479Hz および 4.776Hz は、Z 軸周りのねじれ振動であると判断できるが、IMU の自己雑音レベルが SPC と比較して大きいいため、IMU の計測記録からは確認できなかった。一方で、IMU の Y 軸回転成分に見られる卓越振動数 8.862Hz は、スペクトル振幅が非常に大きく、SPC において卓越が見られないことから、建物振動ではないと考えられる。



(a) 常時微動時



(b) 短辺方向 (X) 並進スイープ加振時

図-3 加速度波形および振幅スペクトル密度

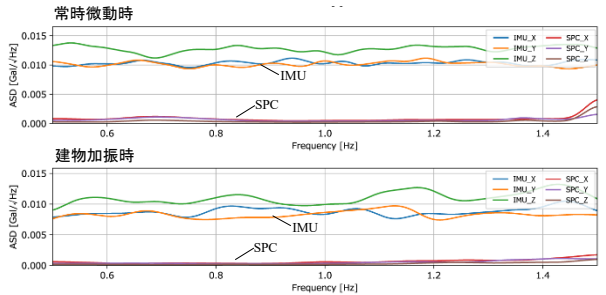
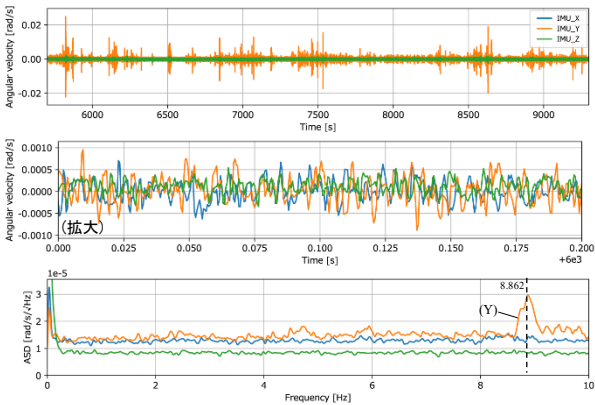
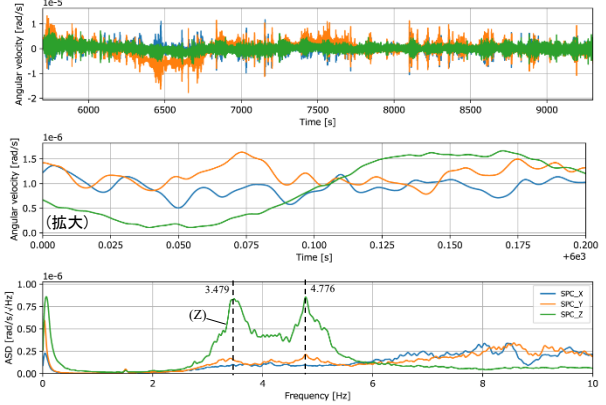


図-4 加速度の自己雑音レベル



(a)-1 常時微動時_IMU



(a)-2 常時微動時_SPC

図-5 角速度波形および振幅スペクトル密度

同様に、短辺方向 (X) 逆位相定常加振 (4.93Hz) 時の時刻歴波形および振幅スペクトル密度 (ASD) を図-6 に示す。逆位相加振においては、屋上階の IMU 計測に不備があったため、同時に計測していた 2 階の IMU 計測結果を用いた。

計測した階 (2 階・屋上階) が異なるため、スペクトル振幅の比較はできないが、IMU の自己雑音レベルを超える回転振動を計測できており、その卓越振動数は 4.929Hz で SPC と一致していた。

角速度計測結果における IMU および SPC の自己雑音レベルについて、振幅スペクトル密度 (ASD) を図-7 に示す。これは、図-4 と同様に、卓越した成分を含まない範囲を拡大している。角速度においても、IMU および SPC では、建物加振の有無や加振方向に関わらず、それぞれ同程度の自己雑音レベルであることを確認した。

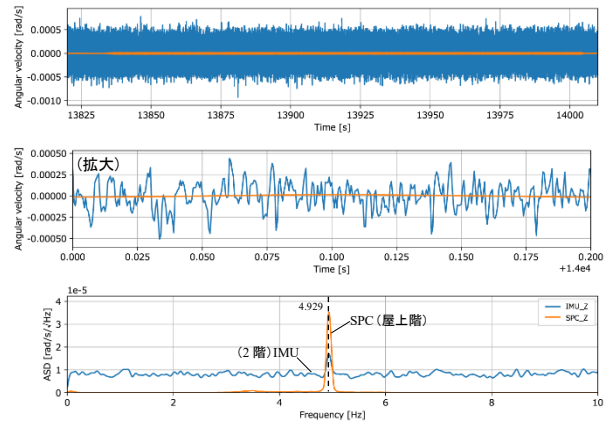
なお、図-4 で示した加速度における自己雑音レベルと比較すると、角速度における SPC の自己雑音レベルが相対的に小さい (IMU の自己雑音レベルが相対的に大きい) ように見えるが、SPC の角速度は加速度計測結果より算出した結果であるため、IMU の角速度センサーにおける自己雑音レベルを評価することはできない。

6. まとめ

ドローンの姿勢制御や位置推定などに用いられている小型の慣性計測ユニット (IMU) について、建物振動の計測への適用性を確認した結果、加速度計測においては、常時微動および建物加振に対する十分な計測性能を有することが分かった。

角速度計測においては、常時微動時のねじれ振動を計測することができず、建物加振時には、卓越振動数を正確に計測できることは分かったが、そのスペクトル振幅については確認できなかった。

今後は、小型 IMU を用いた角速度計測において、どの程度の大きさの建物ねじれ振動に対して適切に行えるのかについて、検討を進めたい。



(b) 短辺方向 (X) 逆位相定常加振時

図-6 角速度波形および振幅スペクトル密度

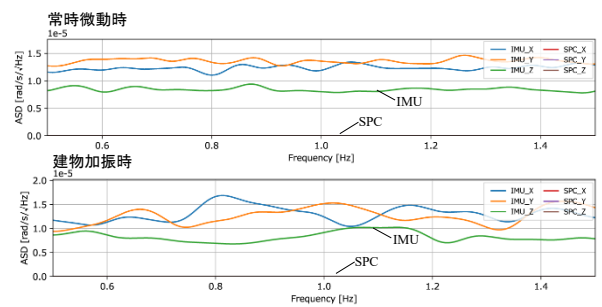


図-7 角速度の自己雑音レベル