

本システムのプログラムは
https://github.com/Komori-GitHub/ShipMonitor_IoT/
で公開中です。

船体動揺監視IoTシステムの開発

Development of IoT System for Monitoring Ship Motion

2024年5月30日

東京海洋大学大学院海洋科学技術科

小森健史



公開ページ QRコード



目次

- 研究背景
- 目的
- システムのコンセプト
- システムの設計
 - 設定の読み込み
 - IMUによる船体傾斜の計測
 - 動揺周期の計算
 - Cloud上のアップロード
 - Webサーバ上での表示
- 実験
 - クラウド上へのアップロード
 - Web Pageでの船体傾斜・動揺周期表示
- まとめ

本システムのプログラムは

https://github.com/Komori-GitHub/ShipMonitor_IoT/
で公開中です。

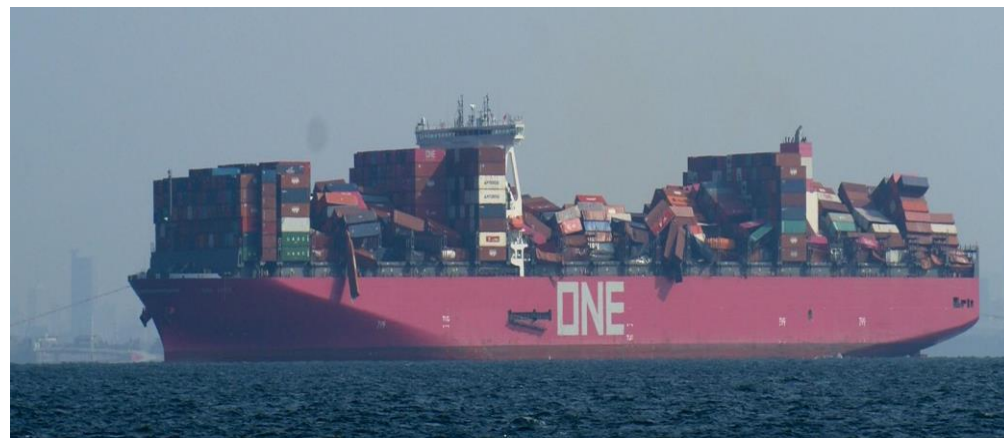


背景

- 前報「IMUを用いた船体横揺れ周期の計測とGMの推定」では以下のことが分かっている。
 - Consumer levelのMEMS-IMUで振幅1度未満の横揺れを捉えられる
 - 横揺れ周期から誤差10%未満でG₀Mを推定できる
- 船の復原力は航行中も減少する恐れがあり、リアルタイムで復原力の変化を把握できることが望ましい。



復原力不足による転覆

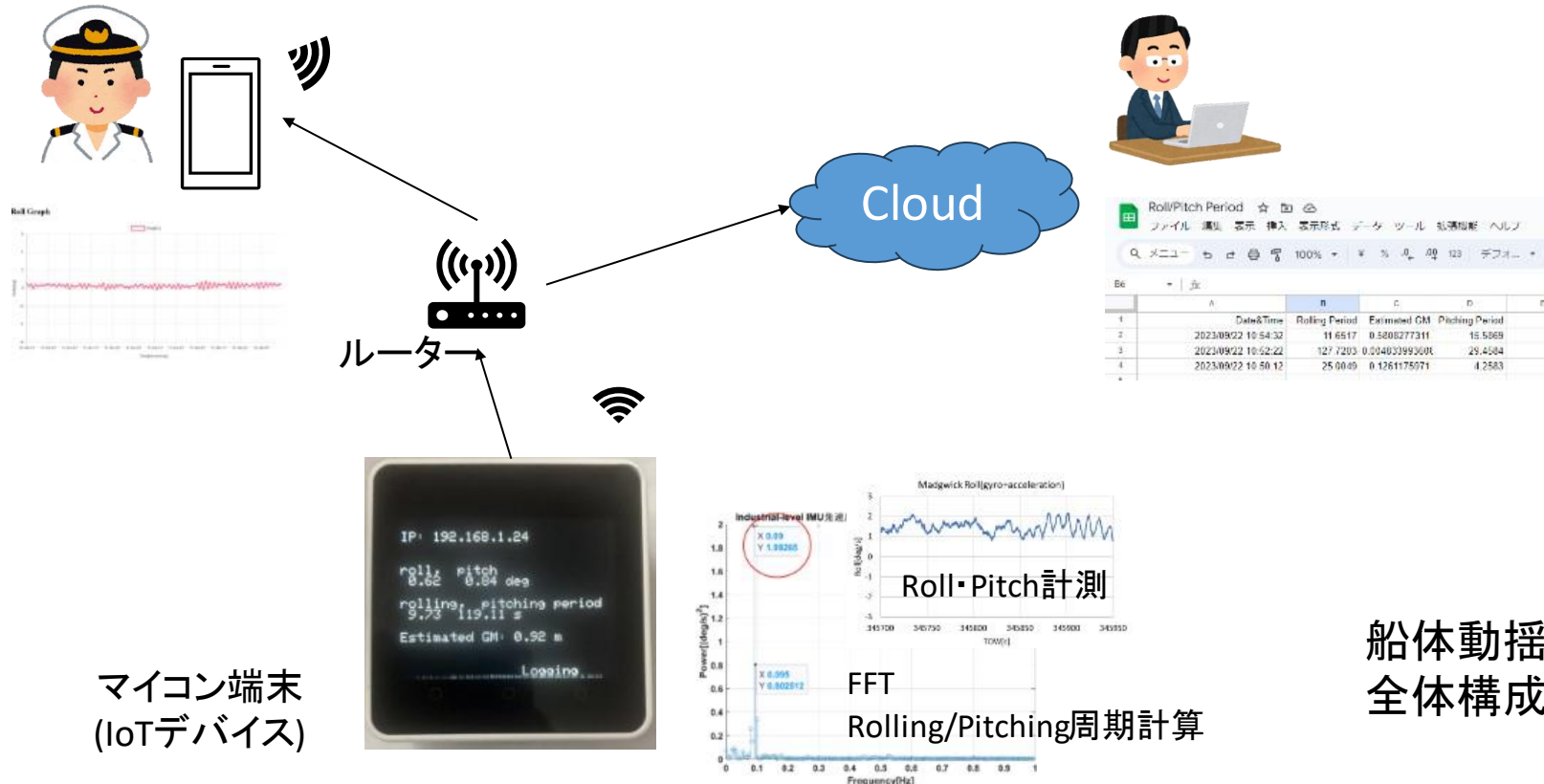


激しい動揺による貨物損害事故



目的

- 船体動揺監視IoTシステムにより、以下のことを可能にする。
 - 横揺れ周期から推定されたGMにより航行中も復原力の大きさを判断する。
 - 固有周期を把握して波浪との共振を防ぐ。



船体動揺監視IoTシステム
全体構成図

コンセプト

- 本システムは市販のマイコン端末とクラウドサービスで動作するようになっており、簡単に導入できる。
- プログラム(Arduino言語・Javascript)はオープンソースとし、応用性を持たせた。



マイコン端末(IoTデバイス) M5Stack Core2

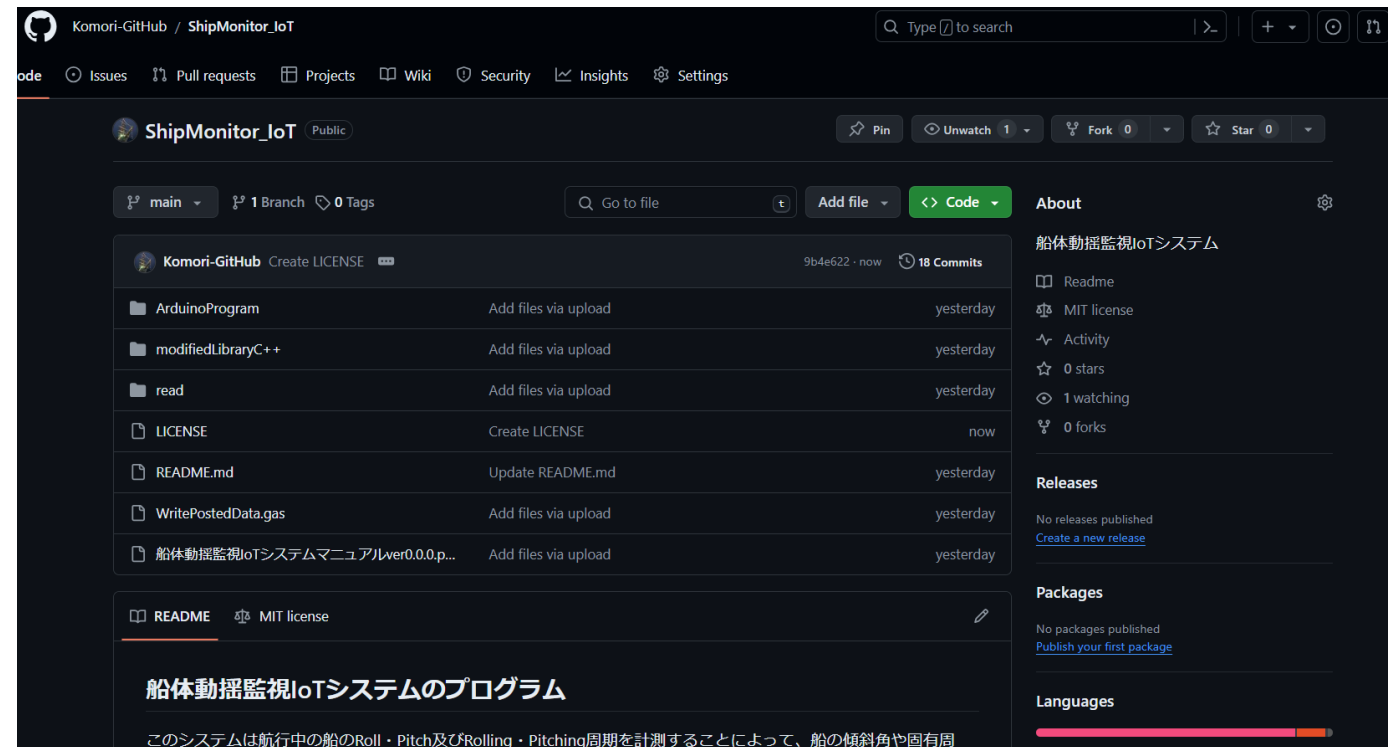
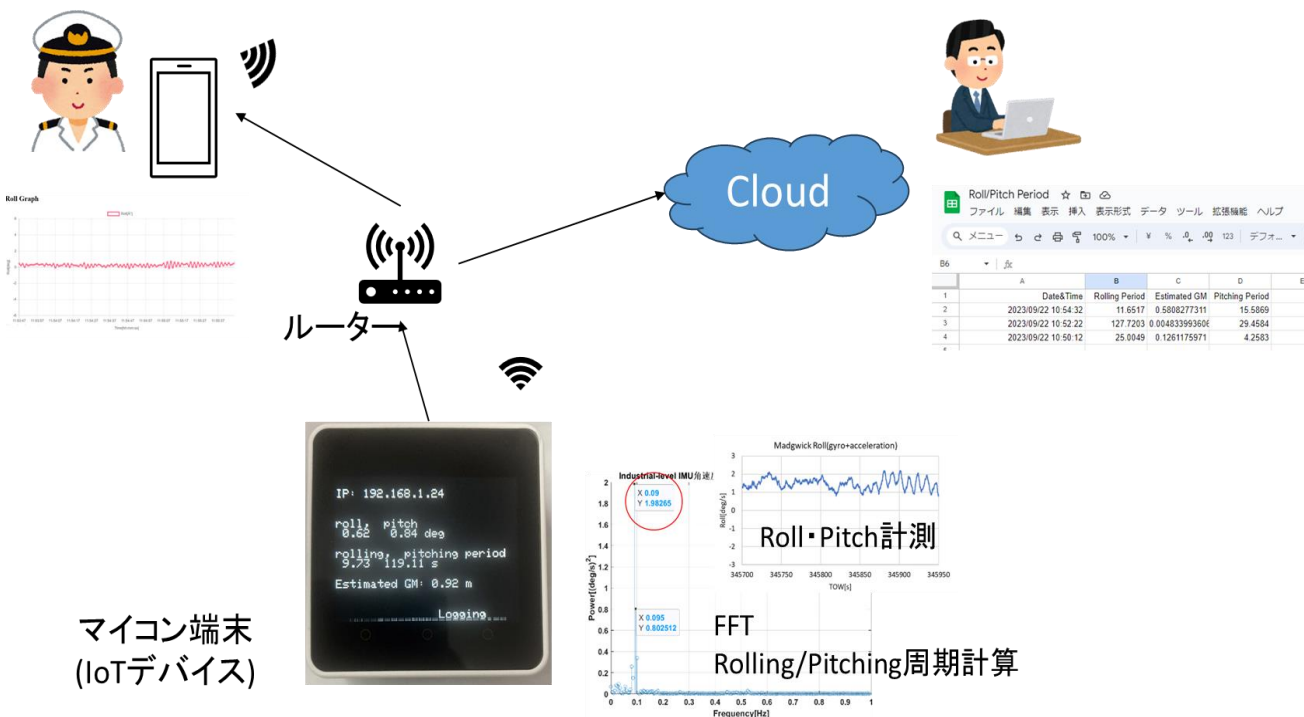


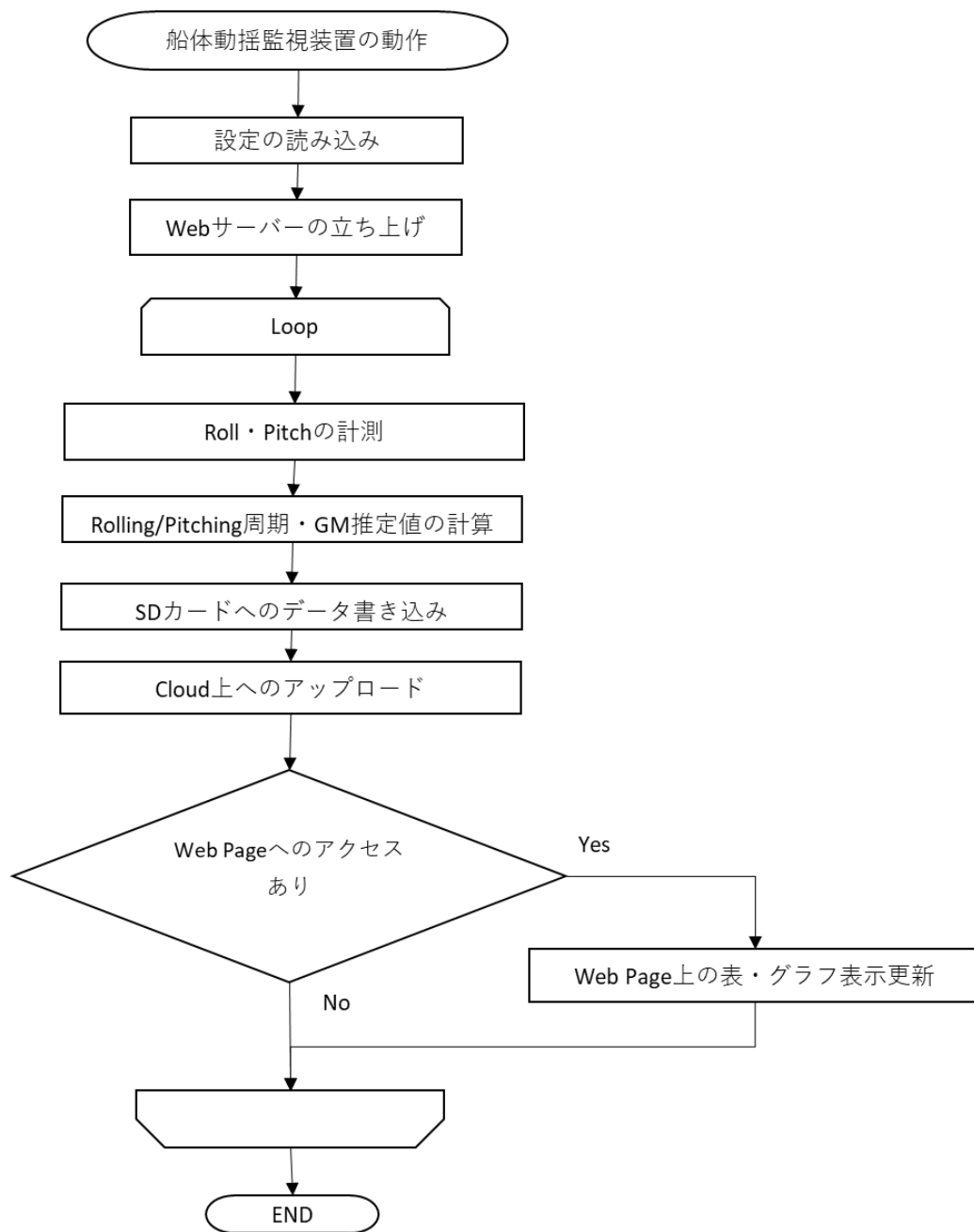
図:プログラムを配布するGithubの画面



システムの設計 端末の動作



船体動揺監視IoTシステム 全体構成図



船体動揺監視装置のフローチャート



システムの設計 IMUによる船体傾斜の計測

- 内蔵のMEMS式IMUで角速度・加速度を計測し、これをMadgwick Filterで統合して傾斜角を求める。
- Madgwick Filterの計算はMicro Controller Unit(MCU)で行う。

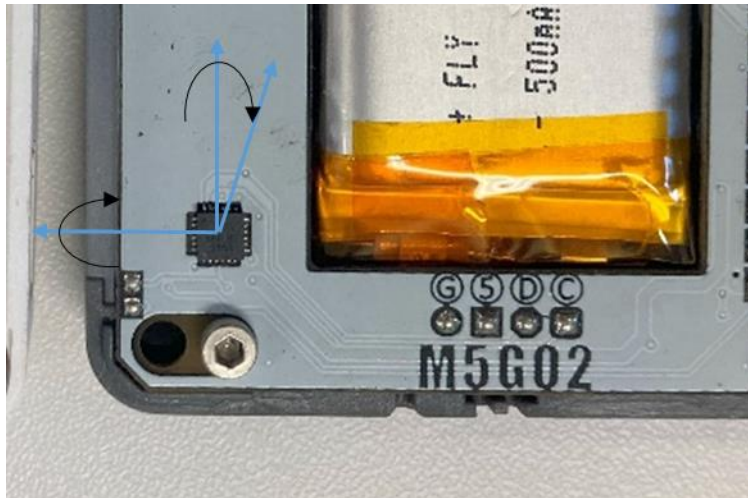


図: MPU6886

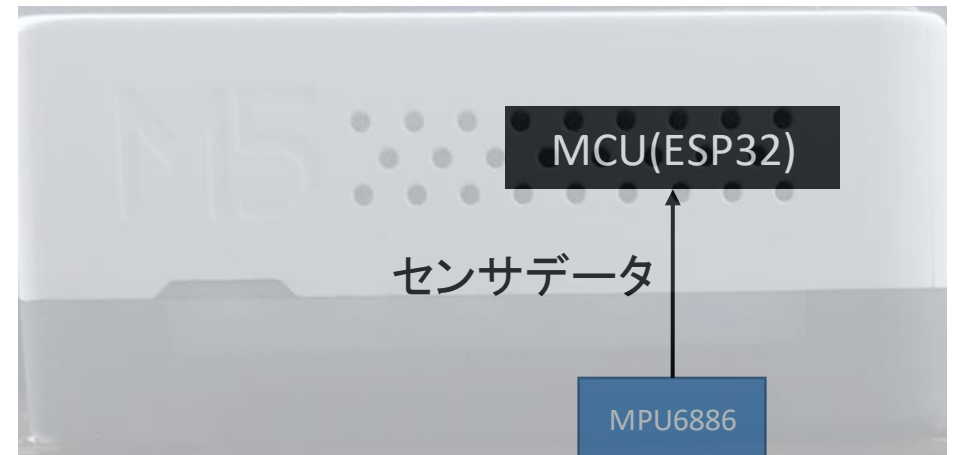
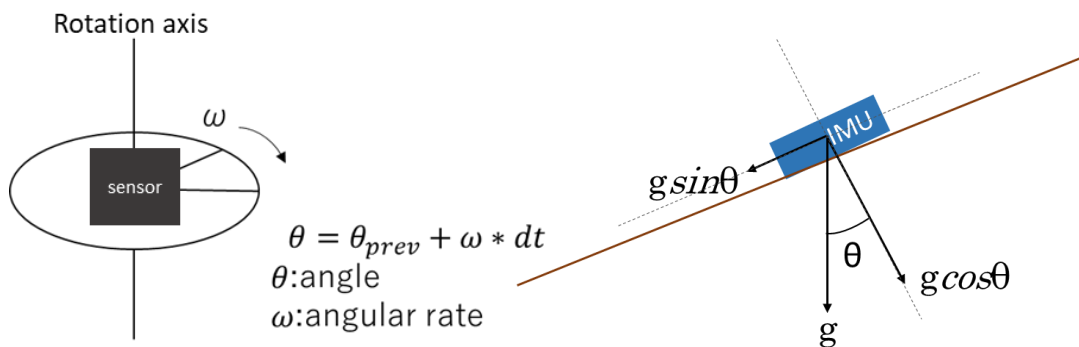


図:M5Core2でのセンサーデータの流れ

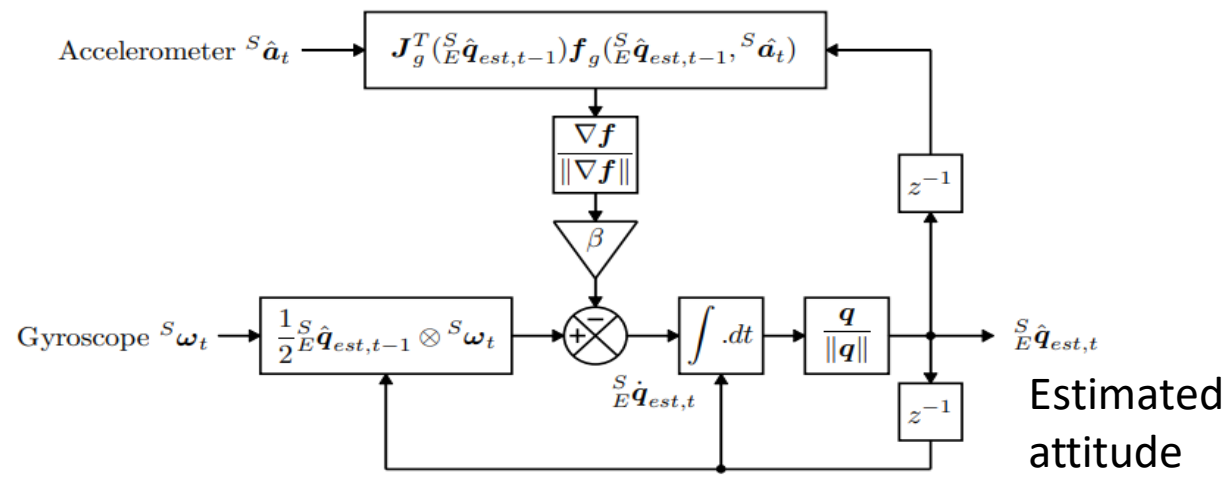


姿勢の計算とMadgwick Filter

- Madgwick Filterで統合することでより正確で、精度の良い傾斜角を求められるようにした。
- Madgwick Filterはサンプリング周波数を低くして計算負荷を減らしたうえで、Kalman Filterと同等以上の精度を実現できる。



角速度・加速度で傾斜角を求める原理

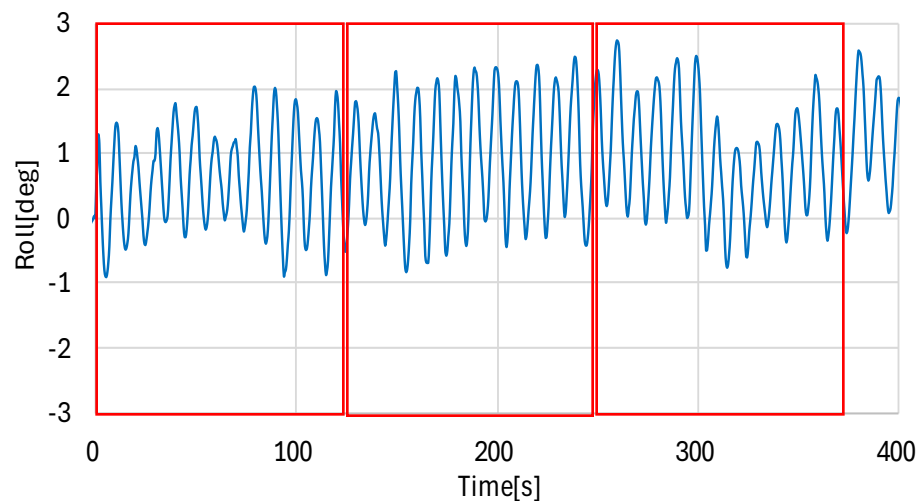


Madgwick Filterのブロック図



システムの設計 時間周波数解析

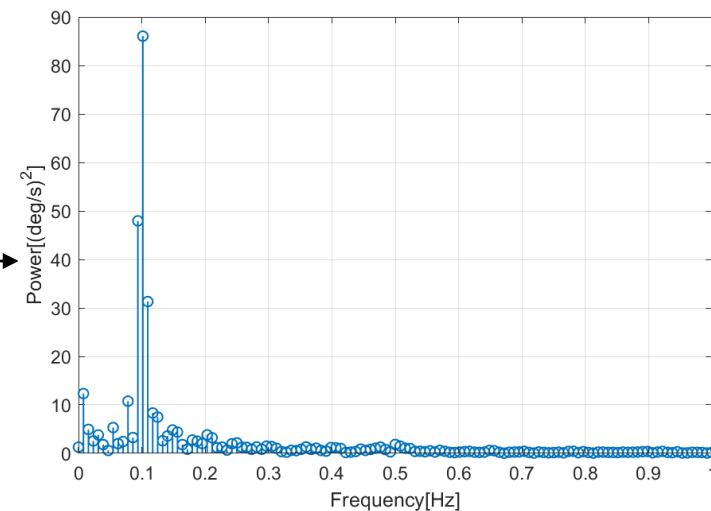
- 計測したRoll,Pitchに対してMCUで短時間フーリエ変換(STFT)を行う。
- フーリエ変換には計算負荷・占有メモリの小さい高速フーリエ変換(FFT)を使用。



IMUで計測したRoll



リアルタイムでSTFT



パワースペクトル図
(FFT結果)

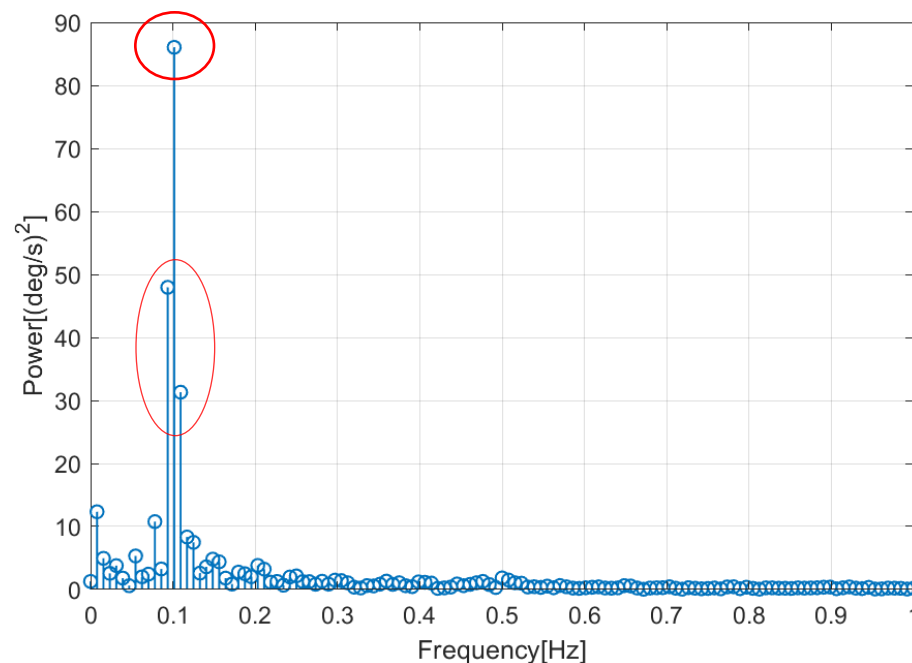
- FFTの結果パワーが最大となった周波数とこれに隣接する周波数で内挿した値をその解析区間でのFFT結果(周波数代表値)とする。

$$\delta = \frac{\left\{ ps(i_{max} - 1) - ps(i_{max} + 1) \right\}}{2 * \left\{ ps(i_{max} - 1) - 2 * ps(i_{max}) + ps(i_{max} + 1) \right\}}$$

$$f_{interpolated} = \frac{(i_{max} + \delta) * f_{sample}}{N_{sample}} (i)$$

$ps(i)$: パワー i_{max} : 最大パワーのindex
 f_{sample} : サンプル周波数 N_{sample} : サンプル数

- $T = \frac{1}{f}$



パワースペクトル図
(FFT結果)

システムの設計 GMの計算

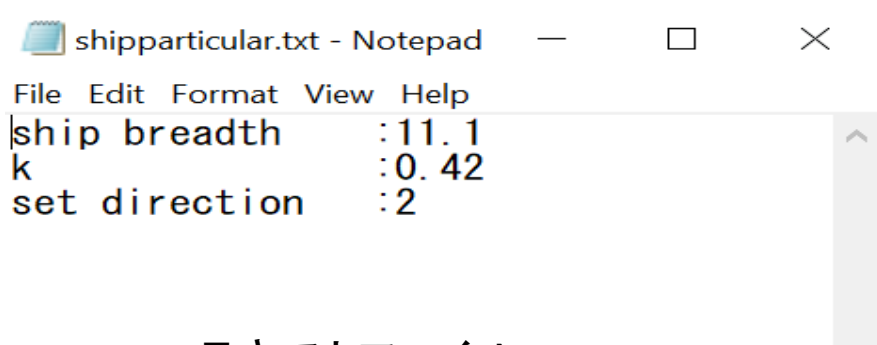
- GMは次式で計算

$$T = \frac{2 * k * B}{\sqrt{GM}}$$

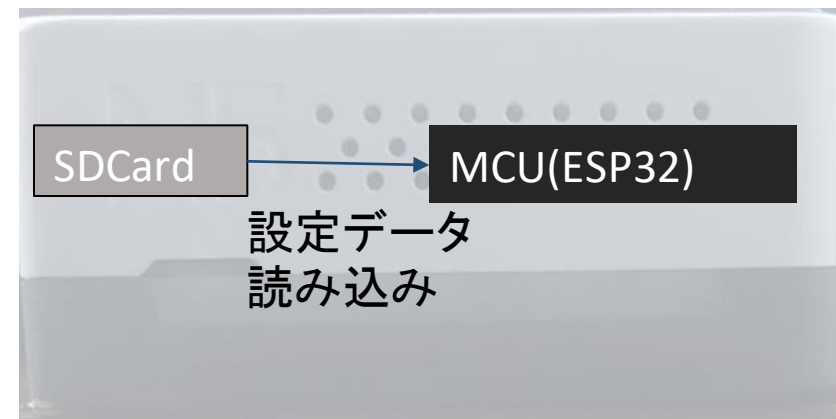
kB :慣動半径

$$GM = \left(\frac{2 * k * B}{T_r} \right)^2$$

- kと船幅についてはテキストファイルに書き込んでおき、プログラム実行時に読み出すようにした。



テキストファイル



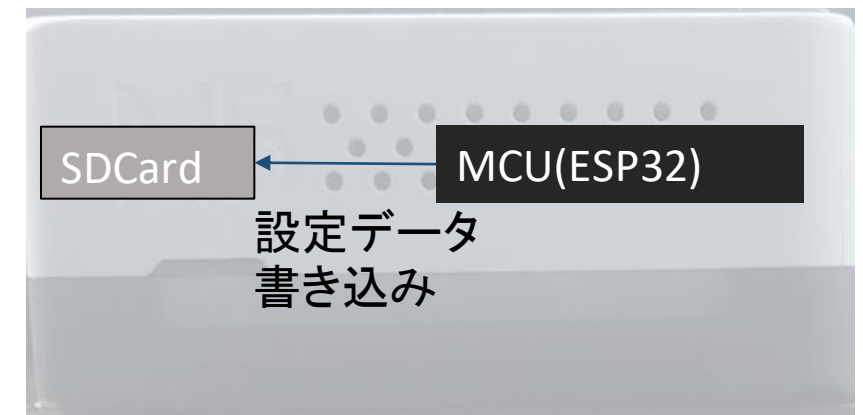


システムの設計 SD Cardへの記録

- ・プログラム内でデータをcsv形式に整えて、ファイルに保存する。
- ・データはSDカードへ書き込む。



マイコン端末に挿入するmicroSD Card



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	JST	ms	gyroX	gyroY	gyroZ	accX	accY	accZ	roll	pitch	roll period	frequency	pitch period	freq
2	10:45:55	72848	0.013396	0.141069	0.261627	0.001678	-0.00152	1.004582	-1.77295	-0.99998	inf	0	inf	0
3	10:45:55	72947	-0.26126	0.217363	0.307403	0.002044	6.27E-05	1.003483	-1.71286	-0.95578	inf	0	inf	0
4	10:45:55	73046	0.074431	-0.42351	0.124298	0.001678	0.001283	1.00507	-1.63891	-0.93826	inf	0	inf	0
5	10:45:56	73145	-0.33756	-0.16411	1.009307	0.001312	-0.00055	1.003239	-1.58902	-0.9093	inf	0	inf	0
6	10:45:56	73244	-0.18497	0.141069	0.307403	0.0018	-0.0003	1.003361	-1.53402	-0.87122	inf	0	inf	0
7	10:45:56	73343	-0.03238	-0.42351	0.048004	0.002777	0.001283	1.00214	-1.47139	-0.85966	inf	0	inf	0
8	10:45:56	73442	0.013396	-0.45402	0.09378	0.001678	0.000551	1.00153	-1.41111	-0.84726	inf	0	inf	0
9	10:45:56	73541	0.08969	-0.37773	0.551544	0.000701	0.000429	1.001164	-1.35074	-0.82966	inf	0	inf	0
10	10:45:56	73640	-0.53592	0.064775	0.109039	0.000701	-0.00067	1.00092	-1.31992	-0.79555	inf	0	inf	0
11	10:45:56	73739	-0.49014	0.369951	-0.22665	0.000213	-0.0014	1.000553	-1.28997	-0.74984	inf	0	inf	0
12	10:45:56	73838	0.013396	0.141069	0.032745	0.000335	0.000551	0.998967	-1.23687	-0.71512	inf	0	inf	0
13	10:45:56	73937	0.349089	0.141069	0.71939	0.000946	-0.0003	0.998356	-1.17476	-0.68258	inf	0	inf	0
14	10:45:56	74036	-0.00186	-0.0573	-0.04355	0.000946	-0.00177	0.997868	-1.13208	-0.65988	inf	0	inf	0
15	10:45:56	74135	-0.21549	0.141069	-0.04355	-0.00015	-0.00067	0.996037	-1.09712	-0.62769	inf	0	inf	0

Csvファイル形式に整えられた計測データ



システムの設計 Cloudへのアップロード

- マイコン端末で計算したデータをJSON形式にしてGoogle DriveへPOSTする。
- Google Spread Sheetに計測データを表示させる。

JSON
 {“ID”:Period,
 “Period”:(11.65,15.58),
 “ID”:GM,
 “GM”:(0.58) }

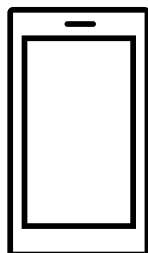


Roll/Pitch Period ☆ 📁 ☁					
ファイル 編集 表示 挿入 表示形式 データ ツール 拡張機能 ヘルプ					
🔍 メニュー ⏪ ⏩ 🖨 🗑 100% ▼ ¥ % .0_ .00 123 デフォ... ▼					
B6 ▼ fx					
	A	B	C	D	E
1	Date&Time	Rolling Period	Estimated GM	Pitching Period	
2	2023/09/22 10:54:32	11.6517	0.5808277311	15.5869	
3	2023/09/22 10:52:22	127.7203	0.004833993606	29.4584	
4	2023/09/22 10:50:12	25.0049	0.1261175971	4.2583	
5					



システムの設計 Webサーバ上での表示

- マイコン端末内部でWebサーバーを立ち上げる。
- 船内ネットワーク内でWeb Pageにアクセスすることで動揺周期、GM推定値などを確認できる。



IP:192.168.1.24

<http://m5shipmonitor.local/table>

<http://m5shipmonitor.local/graph>

Personal M5stack Shipmonitor Server x +

Not secure | 192.168.100.44/table

M5Stack Ship Motion Period

Time[hh:mm:ss](JST)	Rolling Period[s]	Estimated Metacentric height[m]	Pitching Period[s]
16:19:29	2.445993	13.179999	126.327759
16:17:22	2.541676	12.206346	125.610184
16:15:16	124.568008	0.005082	127.102722
16:13:09	2.542302	12.200336	126.445053
16:11:03	2.545625	12.168504	29.253908

Not secure | 192.168.100.44/graph

Roll Graph



Web Page画面

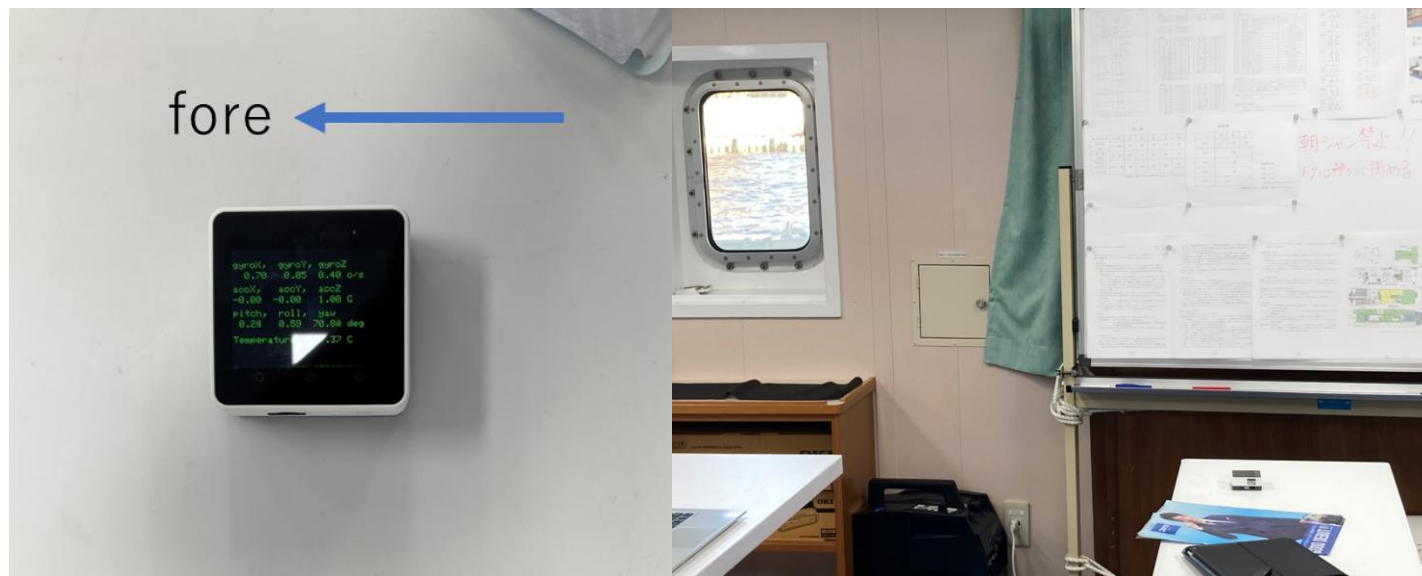


実験1 マイコン端末内部での動揺周期計算 実験概要

- 実験日:2023年8月5日
- 実験場所:豊海ふ頭停泊中の汐路丸
- 教室内に端末を設置して、Rolling周期の計算をリアルタイムに行った。



汐路丸IV世



設置した端末



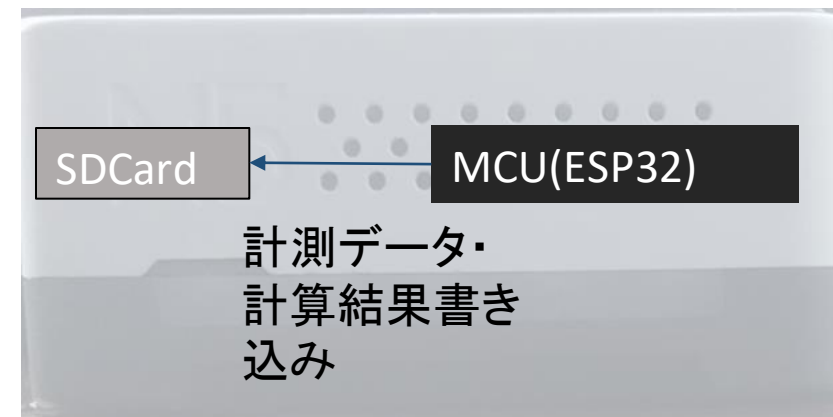
実験1 マイコン端末内部での動揺周期計算

実験概要

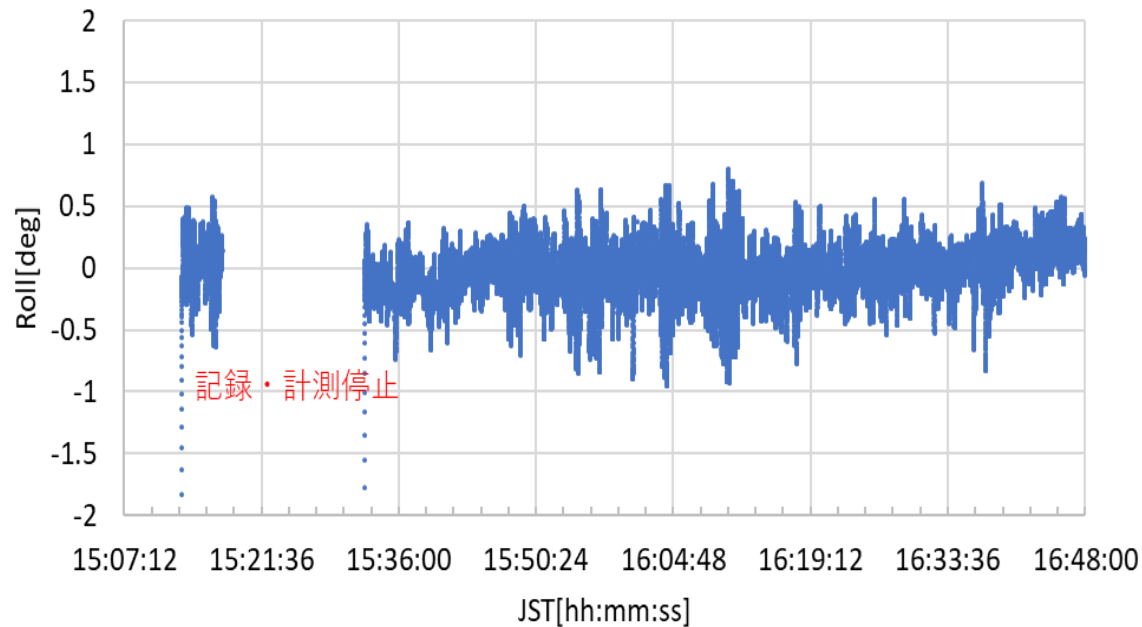
- ・マイコン端末で計測したRollに対して、数値計算ソフトMATLAB®により同条件・後処理で時間周波数解析する。
- ・リアルタイム及び後処理の結果(周期)を比較。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	JST	ms	gyroX	gyroY	gyroZ	accX	accY	accZ	roll	pitch	roll period	frequency	pitch period	freq
2	10:45:55	72848	0.013396	0.141069	0.261627	0.001678	-0.00152	1.004582	-1.77295	-0.99998	inf	0	inf	0
3	10:45:55	72947	-0.26126	0.217363	0.307403	0.002044	6.27E-05	1.003483	-1.71286	-0.95578	inf	0	inf	0
4	10:45:55	73046	0.074431	-0.42351	0.124298	0.001678	0.001283	1.00507	-1.63891	-0.93826	inf	0	inf	0
5	10:45:56	73145	-0.33756	-0.16411	1.009307	0.001312	-0.00055	1.003239	-1.58902	-0.9093	inf	0	inf	0
6	10:45:56	73244	-0.18497	0.141069	0.307403	0.0018	-0.0003	1.003361	-1.53402	-0.87122	inf	0	inf	0
7	10:45:56	73343	-0.03238	-0.42351	0.048004	0.002777	0.001283	1.00214	-1.47139	-0.85966	inf	0	inf	0
8	10:45:56	73442	0.013396	-0.45402	0.09378	0.001678	0.000551	1.00153	-1.41111	-0.84726	inf	0	inf	0
9	10:45:56	73541	0.08969	-0.37773	0.551544	0.000701	0.000429	1.001164	-1.35074	-0.82966	inf	0	inf	0
10	10:45:56	73640	-0.53592	0.064775	0.109039	0.000701	-0.00067	1.00092	-1.31992	-0.79555	inf	0	inf	0
11	10:45:56	73739	-0.49014	0.369951	-0.22665	0.000213	-0.0014	1.000553	-1.28997	-0.74984	inf	0	inf	0
12	10:45:56	73838	0.013396	0.141069	0.032745	0.000335	0.000551	0.998967	-1.23687	-0.71512	inf	0	inf	0
13	10:45:56	73937	0.349089	0.141069	0.71939	0.000946	-0.0003	0.998356	-1.17476	-0.68258	inf	0	inf	0
14	10:45:56	74036	-0.00186	-0.0573	-0.04355	0.000946	-0.00177	0.997868	-1.13208	-0.65988	inf	0	inf	0
15	10:45:56	74135	-0.21549	0.141069	-0.04355	-0.00015	-0.00067	0.996037	-1.09712	-0.62769	inf	0	inf	0

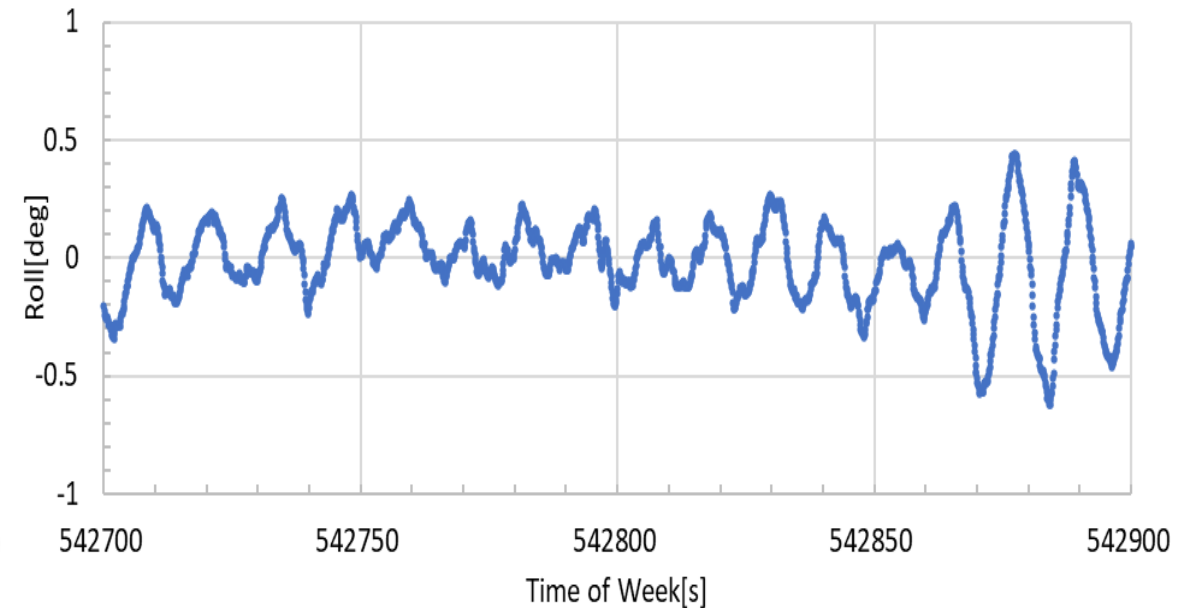
Csvファイル形式に整えられた計測データ・計算結果



- 振幅は $0.2 \sim 0.5^{\circ}$ で見た目の周期は11~14秒程度



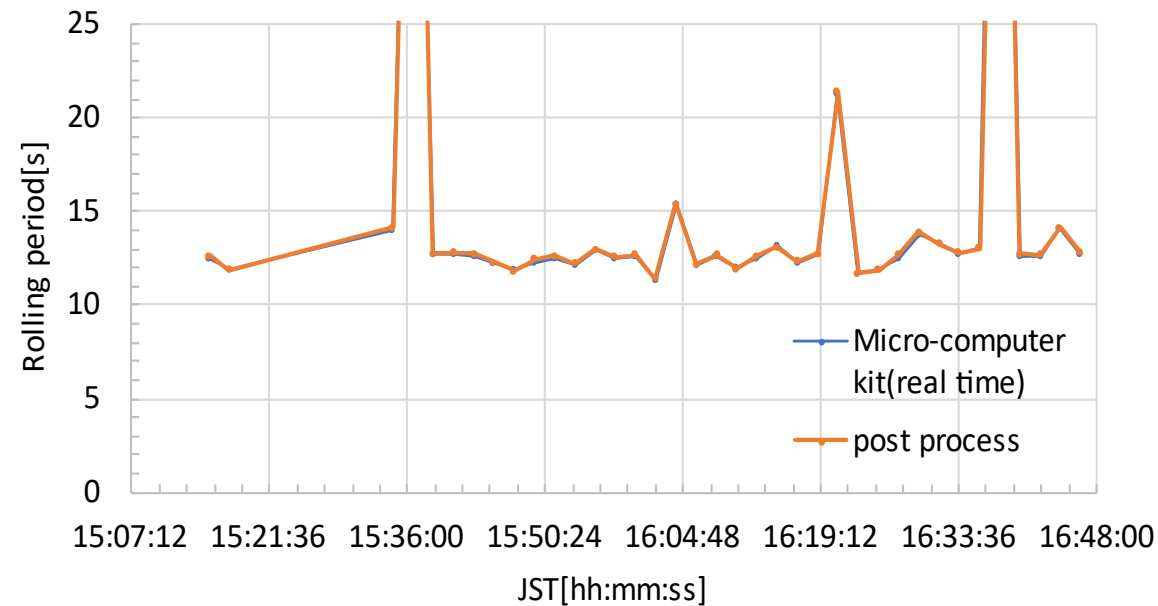
全時刻の Roll



一部時刻の Roll

実験1 結果

- 振幅が 0.5° 以下の小さな横揺れでも正しいであろうRolling周期 (10~14[s])を求められている。
- 横揺れ周期はマイコン端末、数値計算ソフトによる後処理結果でほぼ等しい。



実験2 Cloud上へのアップロード

- 実験日:2023年9月22日
- 実験場所:豊海ふ頭停泊中の汐路丸
- マイコン端末を教室内に設置した。
- マイコン端末内部で動揺周期・GM推定値を求めた上で、Google Driveへアップロードした。
- SDカードに保存された値と比較する。



設置した端末

• 実験動画



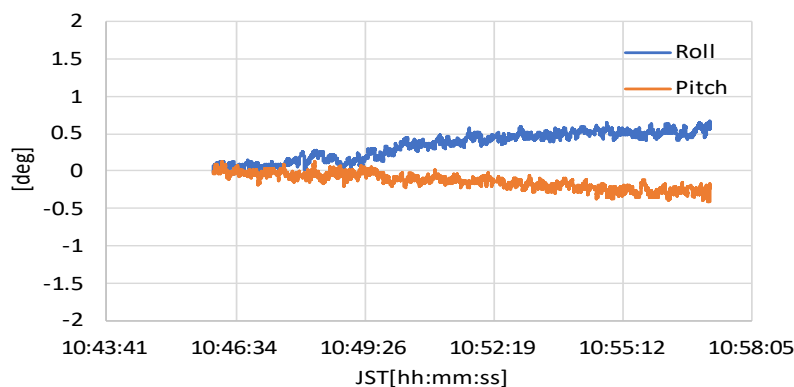


実験2 結果

- SDカードに保存されたRolling/Pitching周期と、Google spread sheetに書きこまれた周期は一致しており、正しい値がアップロードされ&書き込まれている。
 - Roll・Pitchともに揺れが小さかったため、求まった周期は信頼できる値ではない。

SDカードに出力された周期

Time	Rolling	Pitching
10:54:32	11.65175	15.58691
10:52:23	127.7203	29.4584
10:50:13	25.00493	4.258297
10:48:03	29.08285	14.11266



Roll/Pitch Period ☆ 📁 ドライブに保存しました

ファイル 編集 表示 挿入 表示形式 データ ツール 拡張機能 ヘルプ

🔍 メニュー 🗑️ 📄 📏 100% 📏 % .00 .00 123 | デフォ...

	A	B	C	D
1	Date&Time	Rolling Period	Estimated GM	Pitching Period
2	2023/09/22 10:54:32	11.6517	0.5808277311	15.5869
3	2023/09/22 10:52:22	127.7203	0.004833993606	29.4584
4	2023/09/22 10:50:12	25.0049	0.1261175971	4.2583
5	2023/09/22 10:48:03	29.0829	0.09322888959	14.1127
6				

spread sheetに書き込まれた値

実験3 Web Pageでの船体傾斜・動揺周期の表示

- らいちょうIの船内にマイコン端末を設置した。
- 端末上に立ち上げたWebサーバにアクセスして船体傾斜・動揺周期の表・グラフを表示する。
- SDカードに保存されたデータと比較。

実験3概要

日時	1月11日 11:40~12:25
場所	ポンド内
使用船舶	らいちょうI



らいちょうIと設置した端末

• 実験動画

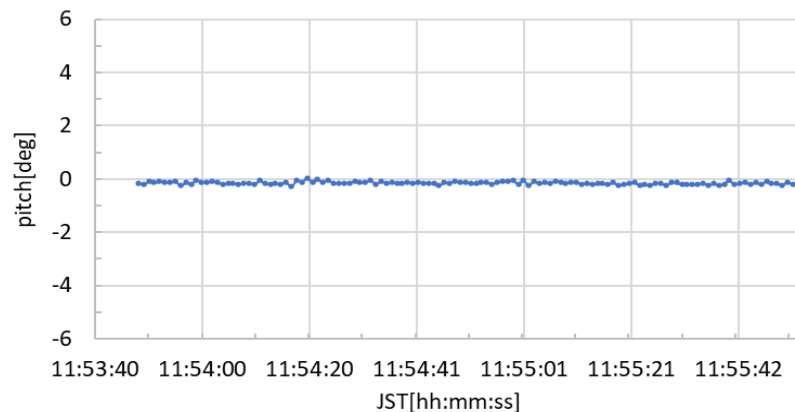
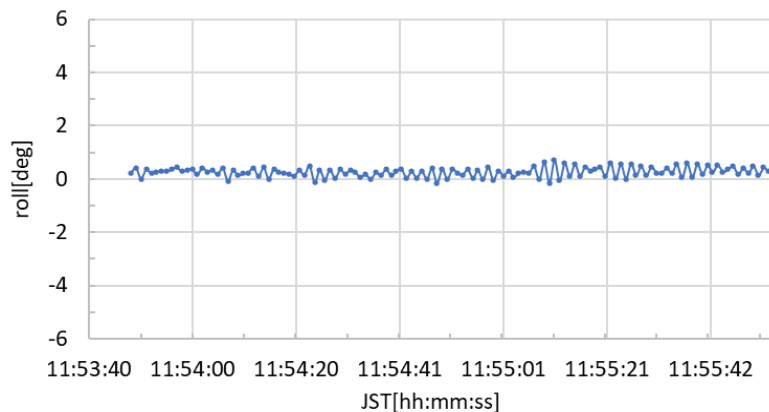


GM推定値・動揺周期の表・Roll・Pitchのグラフの表示



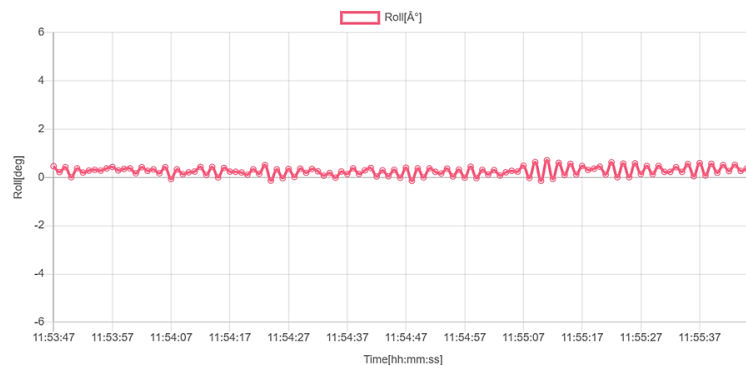
結果

- 一部時刻のRoll/Pitchグラフ
- 計測したデータをWebページ上で正しくグラフ表示できている。



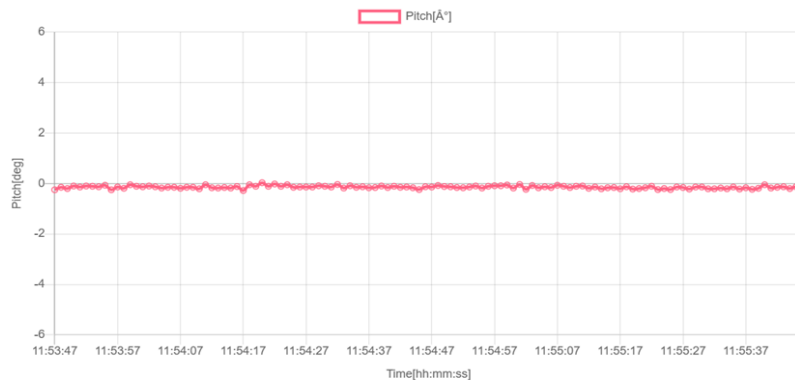
計測データ
(SD Cardへ出力されたもの)

Roll Graph



Roll

Pitch Graph



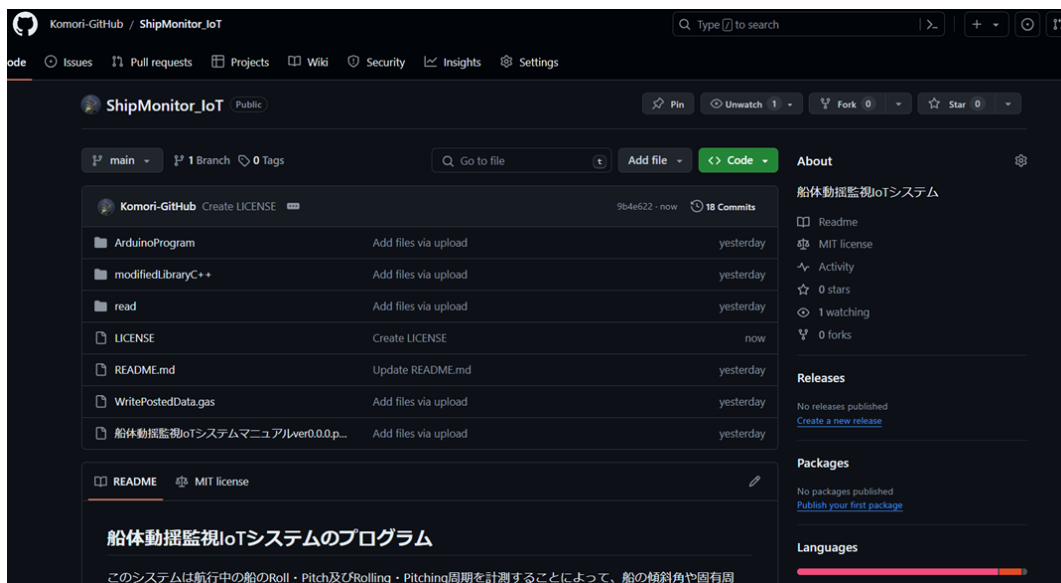
Pitch

Webページに描画された
グラフ



まとめと今後の課題

- ・マイコン端末を用いて動揺周期をリアルタイムかつ正確に求められた。
- ・動揺周期・GM推定値のクラウド上へのアップロード及びWebページでのグラフ表示ができることを確認した。
- ・今後、フィードバックを踏まえながらシステムの改善を図っていきたい。
- ・どの船でも横揺れ周期からGMを正確に推定できるのかは、実際に使ってもらうことにより検証したい。



URL:

https://github.com/Komori-GitHub/ShipMonitor_IoT/



図:プログラムを配布するGithubの画面



謝辞

- 本研究の遂行にあたって、汐路丸での実験機会を設けて下さった鹿島船長と、らいちょうIでの実験機会を設けて下さった東京海洋大学清水教授にこの場を借りて御礼申し上げます。

- (1) 小森健史・久保信明:「IMUを用いた船体横揺れ周期の計測とGMの推定」, 日本航海学会講演予稿集, Vol.11, pp35-38,2023.10.18.
- (2) 濱地 義法・江崎 修央・木村 佳嗣・石田 邦光:「船体傾斜及び横揺れ周期モニタリングシステムの試作」, 日本航海学会論文集 第129巻,pp87-92,2013.12.27.
- (3) 井上 修輔:「大型船舶向け横揺れ周期・傾斜角表示システムの開発」,鳥羽商船高等専門学校,2015.4.
- (4) N. O. Abankwa, S. J. Johnston, M. Scott and S. J. Cox, “Ship motion measurement using an inertial measurement unit”, 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT),pp. 375-380, 2015.12.14.
- (5) Sebastian O.H. Madgwick: “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays” ,2010.4.30.
- (6) Enrique Condes: arduinoFFT ver1.6,
<https://github.com/kosme/arduinoFFT>,2023.10.13.
- (7) IMO: RESOLUTION A.562(14)
RECOMMENDATION ON A SEVERE WIND AND ROLLING CRITERION (WEATHER CRITERION) FOR THE INTACT STABILITY OF PASSENGER AND CARGO SHIPS OF 24 METRES IN LENGTH AND OVER,1985.11.
- (8) Chart.js ver.2.9.4, <https://www.chartjs.org/>,2023.12.7.