

揺れる船上での高精度太陽追尾システムの開発

—性能評価のための波揺れシミュレータ台の製作—

○山崎高幸^{A)}、岡本 渉^{A)}、松見 豊^{B)}

^{A)} 計測制御技術支援室 観測技術グループ

^{B)} 宇宙地球環境研究所

概要

太陽を追尾しながら大気中の CO₂ スペクトルを取得する地上固定観測システムをもとにして、海上のデータ取得を可能にする船上観測システムを開発している。今回は船上に搭載した時の太陽追尾の機能を検証するために「波揺れシミュレータ台」を製作した。この装置はリニアステージとモータードライバを用いてステージ台を垂直上下で動かす傾斜台方式で、パソコン上の Excel と Visual Basic Application(VBA)マクロで制御する。まず、実際に搭載する船に並進・角度の加速度センサーを取り付けて航海時の波揺れのデータを取り、その状態を再現したシミュレータ台の上で、大気中の CO₂ スペクトルを取得するシステムを稼働させ太陽追尾の性能を確認した。このシステムおよび研究所屋上での実験の様子について述べる。

1 太陽追尾装置の開発と洋上の観測

この装置は CO₂ のカラム濃度を太陽直射光のスペクトルから測定する装置です。これまで地上に装置を置いて国内 6 か所で 2-3 年連続測定の実績を上げてきました。太陽の視直径は 0.5 度でありこれは天体運動で時間にすると 1 分に相当するので地上では数秒に 1 回程度の望遠鏡の動きで十分です。南鳥島に 2019 年設置し、観測を継続しています。そして海洋上の船での計測するプロジェクトが始まりました。図 1 は JAMSTEC 観測船「みらい」船上に搭載したときの記念写真です。船は大きく揺れますし、波の揺れは大型船でも 8 度程度の振幅があるため、技術的には難しいものですが我々は揺れる船上でも高精度に太陽追尾できるように、まずは性能評価のための波揺れシミュレータ台の製作を行うことにしました。

2 船舶上での太陽追尾の原理

地上では東西南北を固定し、理論的な計算で太陽の方向は求まりますが、船上では方位は自由に変わってしまいます。そこで我々は全天カメラで太陽位置を探索して、太陽方向を向ける方式に装置を改良しました。図 1 のように全天カメラは追尾装置の横に固定しました。図 2 のアクリルドーム内が太陽追尾装置です。望遠鏡と追尾カメラは平行に取り付けられています。追尾カメラに捕獲された太陽方向を向くように、モータ駆動経緯儀が動くように設計されています。



図1. みらいに搭載した太陽追尾装置



図2. 太陽追尾装置

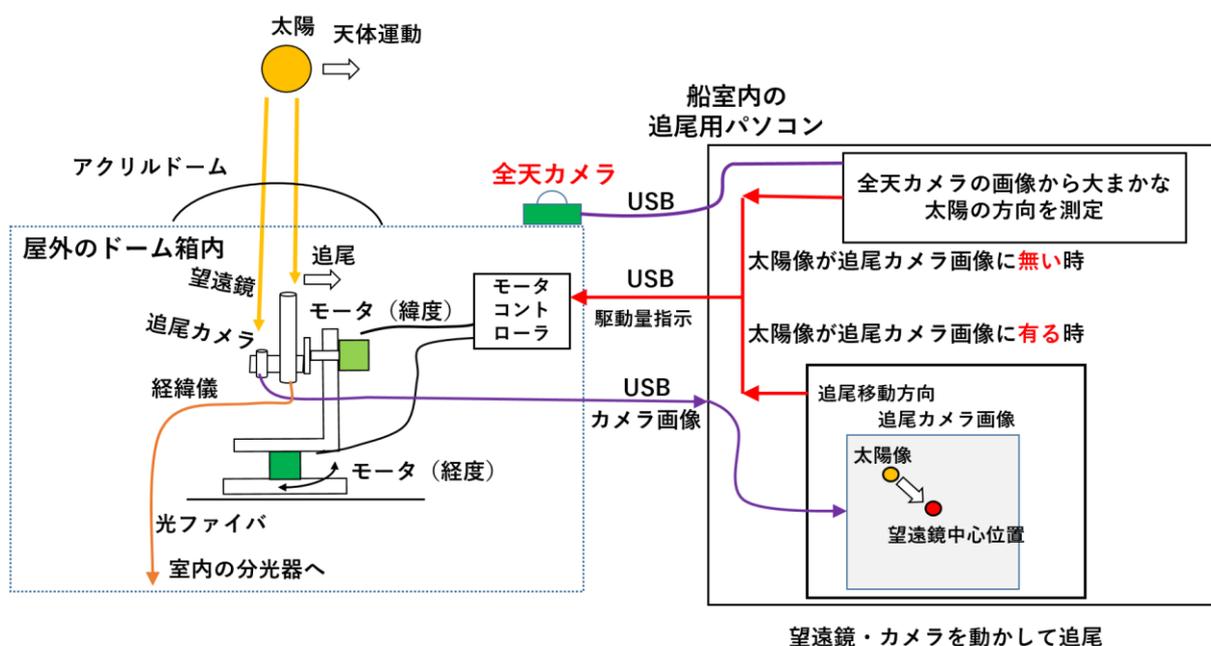


図3. 船舶上での太陽追尾の原理

船舶上での太陽追尾の原理ですが、全天カメラの画像から大まかな太陽の方向を特定する方式に改良しました。太陽像が追尾カメラに無いときは、全天カメラで捉えた太陽方向に太陽追尾装置は向きます。追尾カメラに太陽像が有るとき捕獲された太陽方向を向くように、モータコントローラに駆動量を指示します。追尾カメラは毎秒、画像上で望遠鏡中心とズレがあった場合、その方向に動かします。太陽位置はカメラ画像上の太陽像は円形ですがその重心位置を求めております。現在の地上で運用している太陽追尾装置は、画像認識から望遠鏡を動かす動作を繰り返し数回動かして最終的にほぼ一致させています。



図4. 追尾カメラ (左) と全天カメラ (右)

図4の右図は全天カメラ画像です。真ん中は天頂で丸い外円が水平方向となります。緑色の右上の○が太陽位置になります。図4の左図は、追尾カメラ画像です。望遠鏡中心の赤丸と太陽位置の緑色の○が重なっているという事は追尾できているという事になります。

3 波揺れ計測

最初に船がどの程度揺れるか知る必要があるという事になり、9軸加速度センサー【HWT905-TTL MPU-9250】(図5)を購入しました。このセンサーは、XYZの角度、加速度、角速度が求められます。このセンサーを用いて小型PCによる収集システムを自作し、気象庁観測船船室に設置し(図6)、約3か月実測しました。



図5. 9軸加速度センサー (HWT905-TTL MPU-9250) とデータ処理システム



図6. 波揺れセンサー及び太陽追尾装置の凌風丸への設置場所 (赤矢印)

赤矢印が波揺れセンサーの設置場所 (図10) 及び太陽追尾装置設置の予定場所です。太平洋沖へ出港した船の波揺れセンサーで記録したデータ (2021年9月8日) です。上が Rolling 角度、下が Pitching 角度です。晴天時に 7-10 秒程度の周期で振幅は最大 8 度程度であった事がわかりました。

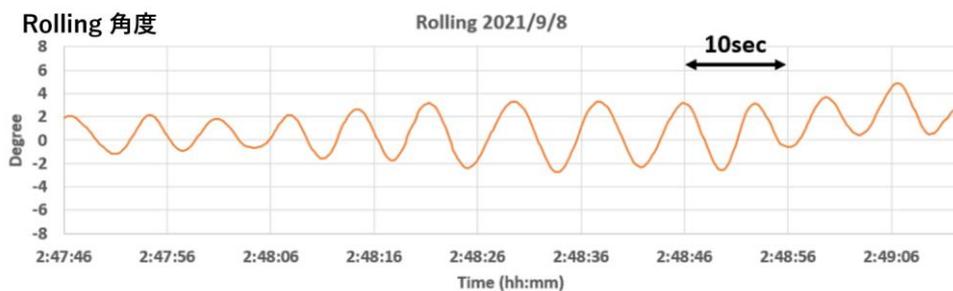


図7. 太平洋上の船の Rolling 角度

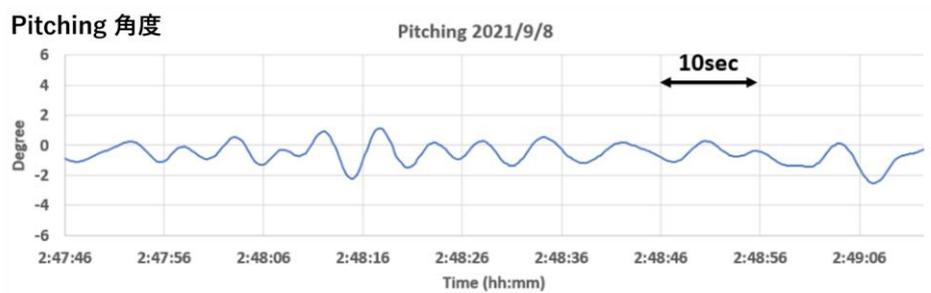


図8. 太平洋上の船の Pitching 角度

4 波揺れシミュレータ台の製作

図9が製作した波揺れシミュレータ台です。リニアステージとモータ駆動部はセット品で購入しました。ボールねじの長さは 150mm です。赤丸位置にリミットセンサーを取り付けました。台はミスミのアルミフレームで組み立て、傾斜台方式としました。揺れシミュレータ台の製作のための材料費は、制御パソコンは除いて全体で4万円程度でした。他主要な部品について説明します。

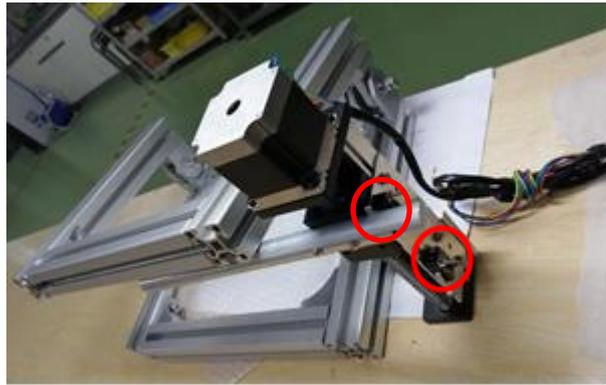


図9. 製作した波揺れシミュレータ台 (赤丸はリミットセンサー)

位置センサーとしてリニアポテンション抵抗器を使用しました。可動範囲は100mmのものを使用しました。



図10. 位置用リニアポテンション抵抗器

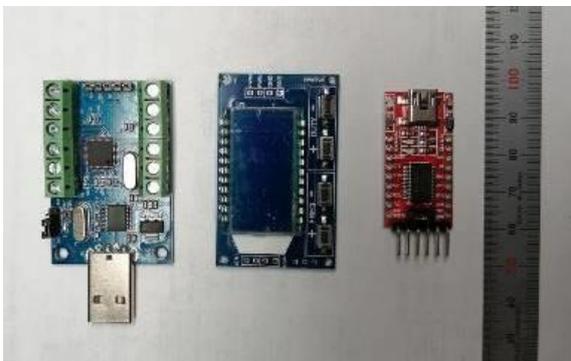


図11. 右：USB シリアル変換器シリアル通信デバイス
中：パルス発生器周波数表示器付き
左：USB A/D データ収集モジュール

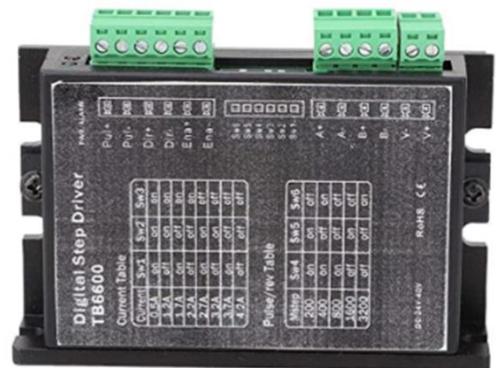


図12. パルスモーター用ドライバー

図11 (左) の写真が位置検出に用いる USB 位置制御用 A/D データ収集モジュール、図11 (中) がパルス発生器周波数で、1Hz~150kHz のパルスが作れるモジュールで表示器付きです。図11 (右) が USB シリアル変換器でパルス発生器に信号を送るためのモジュールです。

図12 が DC 24-40V で使用できるパルスモーター用ドライバです。今回 24V で使用しました。使用したデバイスは 5V で動作するので、USB ケーブルを通して給電しました。A/D コンバータおよびパルス発生器はシリアル信号で制御します。COM ポートは2つ必要なので USB Hub を使ってノート PC と接続しました。

図13 は電源及び各種デバイスを組み込んだ波揺れシミュレータのコントローラーです。表示用の LED や手動用のスイッチも画面手前に付いています。図14 は研究所屋上で実験した時の「波揺れシミュレータ台」の上の太陽追尾装置です。図15 は波揺れシミュレータで傾斜した様子です。



図 13. コントローラボックス



図 14. 研究所屋上の「波揺れシミュレータ台」
の上の太陽追尾装置



図 15. 波揺れシミュレータで傾斜した様子

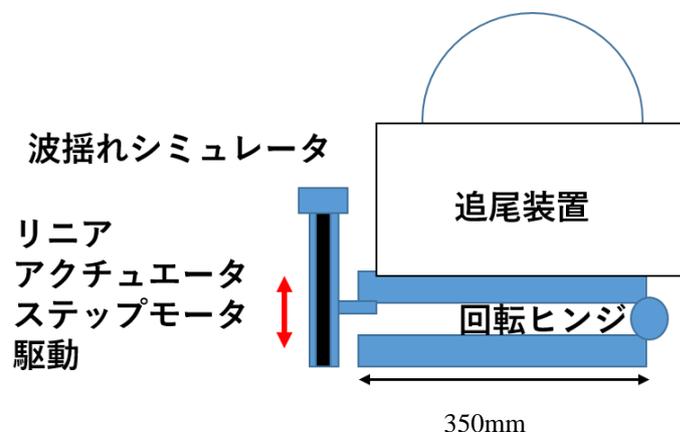


図 16. 波揺れシミュレータ台の模式図

図 16 は波揺れシミュレータ台の模式図です。このように回転ヒンジを軸として、リニアステージに固定した腕の高さをステップモータ駆動で高さを上下する事でサイン運動を実現します。揺れの再現の制御はパソコン上の Excel と Visual Basic Application(VBA)マクロで行ないました。シリアル通信のライブラリは EasyComm を利用した。ポートの設定は下記の通りです。

- ① シリアル通信デバイス (ボーレート 9600, パリティビット数 なし, データビット数 8 , ストップビット数 1) パルス発生器と繋げる
- ② 位置制御用 A/D (ボーレート 115200, パリティビット数 なし, データビット数 8 , ストップビット数 1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
2	揺れシミュレータ制御マクロプログラム										Maxパルジェネ周波数		
3	設定だが勝手に変えてはいけない										Max speed	20 mm s-1	5000 Hz
4	入力値										Pulse COM	7	無印(FTDI)
5	出力										AD COM	8	CH340
6	Start										Status	Ready	D000
7	位置許容	0.5 mm	12bit 4096		Digital値	Voit(V)	許容範囲(digit)	Check Pos	中点から	19.80 mm	D050		
8	上リミット	3078	2.47	2799.2	40	下リミット	290	0.23	Digital	2236	OK		
9	中点	1684	1.35	2788	2.24	差	2788	2.24	移動	行先	20 mm	中点から計算 ±40mm以内	
10	mm/digital	0.03587	27.88	Stop	Go	スピード	10	mm s-1 <	20	Iteration No.	0	Stopped	F900
11	移動刻み	1	sec	Wait Time	100	msec	サイン往復運動						
12	全可動距離	100	mm	Sine		周期(整数)	10	sec	>	6	最小値		
13	上下の許容	10	mm	全振幅		40	mm	<	60	最大値			
14	Hz	100mm sec	mm s-1	mm s-1 Hz-	8	0.004							
15	パルジェネ周波数	2000	12.5	8	0.004								

図 17. Visual Basic Application(VBA)マクロ画面

緑色のハッチは制約として設定で安定動作範囲を決められるのですが最大周波数 5kHz、位置許容範囲は 10mm、最短周期は 60sec、最大振幅 60mm として条件を決めました。リミット位置のデジタル値は 5V 電圧をかけその電圧値をデジタルに変換して値を読み取ります。また可動可能距離はリニアポテンション抵抗器の範囲を同じ 100mm です。図 17 の右下の青い四角のところがサイン波形の駆動の制御です。周期設定を 10 秒、揺れ全振幅を 40mm にして、ボタンを押すことによりサイン運動が始まります。傾斜台は 350mm フレーム長なので、下記の式より、約 8 度の傾きとなります。

$$\text{Arctan}(20/350) \times 2 = 8^\circ \text{ (程度)}$$



図 18. 波揺れシミュレータ台を用いた性能評価試験の様子 (建物屋上にて)

5 実験結果

検証試験結果の一例を示します。屋上で波揺れ装置を動かして太陽追尾ソフトで確認しました。下記の画像は揺れで上に持ち上がった時と下に下がった時を表します。S は太陽の Pixel 面積、括弧内は追尾カメラの Pixel 位置 (横、縦) を表します。全画面で 640x400 です。視野は縦のエリアが 400 Pixel で 18 度です。追尾ソフト上の太陽画像のずれから、太陽直径の 3 倍程度、角度で 1.5° 程度の振幅がありました。

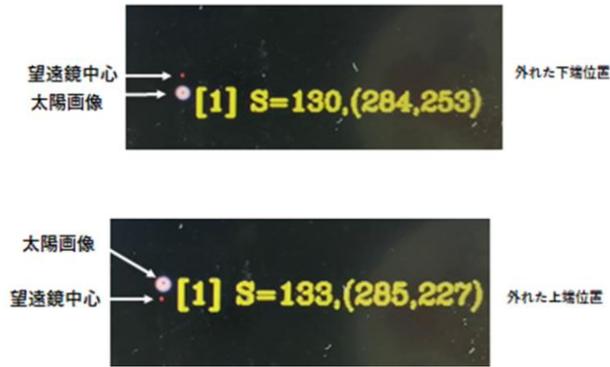


図 19. (上) 太陽追尾装置が上にあがった時の太陽位置
(下) 太陽追尾装置が下にさがった時の太陽位置

6 まとめ (考察と今後の課題)

船の揺れを再現できる「波揺れシミュレータ台」を製作したが、今までの地上用の太陽追尾装置では船の揺れに追いついていない。今後の解決法として第 1 に望遠鏡の角度追尾のレスポンスを高速にするために追尾画像の処理に追尾カメラを使うのをやめ、高速でデータ転送ができる 4 素子の受光器に変えて処理速度を上げる事を検討している。第 2 に、波揺れシミュレータで動作中に追尾カメラの太陽位置を見ているとかなりパターン化している事から、レスポンスを考慮して先回りして適切な位置に持って行く「予測位置」の計算が可能だと考え、太陽追尾処理に「予測」の機能を取り込む事を検討している。アルゴリズムを改良して太陽が入る確率を数倍上げることは可能ではあると思う。