ソフトウェア無線による月測位受信機のラピッドプロトタイピング

第10回　月測位研究会
2025年6月3日 (火)
曽布川璃音 (中部大学)

1.　背景 / LunaNet・LANS概要

月探査活動の高まり

- 月面・月周回における自律的・高精度なPNTサービスが要求される
- 国際協力による相互運用可能なPNTサービス構築の流れ

LunaNet構想：NASA主導の月通信・航法アーキテクチャ

- NASA/ESA/JAXAなど複数のサービスプロバイダーが協調・連携

LANS ：月拡張航法サービス

- LunaNetにおいて，GNSSライクなPNTサービスを提供
- AFS *と呼ばれる測位信号を放送

  * Augmented Forward Signal

2.　動機 / 目的

AFS仕様の公開

- LSIS-AFS v1 * が2025年1月29日に公開
  *LunaNet Signal-In-Space Recommended Standard
- 主要な信号仕様（中心周波数，変調方式，拡散符号など）が決定
- 一方で時刻系，座標系，メッセージフレームの内容などは未定義

目的

- 将来的な月面での実証に向けた受信機の開発
- SDRベース受信機プロトタイプの開発・実証
- 受信機評価のためのベースバンド信号シミュレータの開発
- Raspberry Pi 5 組み込みでのリアルタイム測位の達成

3.　課題

1. **LANS AFS受信機の開発**
   - 将来の月面における利用実証に向けた受信機を開発中
   - 月測位信号の一部仕様は調整中

2. **現在運用中の衛星がない**
   - 現時点で，AFS信号を放送する衛星はない
   - **受信機の評価のためには，信号シミュレータも必要**

3. **月面上で使用する受信機の制約**
   - サイズ・重量・電力の制約が重要になってくる
   - 従来のPCベースのSDRは，これを満たせない

4. 達成

1. **月測位受信機の開発**
   - オープンソースSDR GNSS受信機 “PocketSDR” をベースに採用
   - 月測位信号シミュレータで生成したベースバンド信号を用いて機能検証

2. **月測位信号シミュレータの開発**
   - オープンソースGPS信号シミュレータ “gps-sdr-sim” をベースに採用
   - 月軌道を周回する測位衛星から放送された電波を模擬

3. **Raspberry Pi 5 上で受信機のリアルタイム処理の検証**
   - 月測位受信機をRaspberry Pi 5 上で動作・検証

5.　AFS信号の仕様

GPS/QZSS L1C/A，L1CとLANS AFSの比較

System			GPS/QZSS			LANS	
Signal			C/A	L1C		AFS	
Center Freq. [MHz]			1575.42	1575.42		2492.028	
Component			L1CA Data	L1CD Data	L1CP Pilot	AFSD Data	AFSP Pilot
I/Q			Q	I	Q	I	Q
Modulation			BPSK(1)	BOC(1,1)	TMBOC(6,1,4/33)	BPSK(1)	BPSK(5)
Primary Code	Length	[chips]	1023	10230		2046	10230
	Period	[ms]	1	10		2	2
Secondary Code	Length	[chips]	-	-	1800	-	4
	Period	[ms]	-	-	1800	-	8
Tertiary Code	Length	[chips]	-	-	-	-	1500
	Period	[ms]	-	-	-	-	12000

5.　AFS信号の仕様

Dataチャンネル (AFS-I) / 航法メッセージ

- AFS-Iの目的 : 航法メッセージの放送，FECはLDPCとインターリーブ
- 拡散符号の生成手法はGPS L1C/Aと同様 (Gold符号)

- SP + 4つのサブフレーム，フレーム長は12秒・6000 symbol

- SP　: 68 symbol のSynchronization Pattern(SP)
- SB1　: TOI (Time of Interval)，FID (Frame Identifier)を含む
  9bit，BCH符号化
- SB2　: CED (Clock and Ephemeris)を含む
  1200 bit，LDPC(1/2)符号化
- SB3，SB4　: 未定義
  870bit，LDPC(1/2)符号化

5.　AFS信号の仕様

Pilotチャンネル (AFS-Q)

- AFS-Iの目的：データレス，高感度な信号捕捉・追尾など
- 拡散符号はGPS L1CPと同一 (Weil符号)

- 階層符号：Secondary Code，Tertiary Code
  - 長時間のコヒーレント積分による，耐弱信号性能の向上

6.　月測位信号シミュレータ

月測位信号シミュレータの概要

- 開発ベース：GPS-SDR-SIM
  - オープンソースのGPS信号シミュレータ

- **月面で受信されるLANS-AFS信号波形を模擬**
- 月測位受信機の測位性能評価のために開発

- 未定義の時刻系・座標系・軌道モデル・メッセージ内容等は
  コード変更で対応可能
- 衛星数・軌道・ユーザ位置なども設定可能

- LSISの仕様はほぼ実装

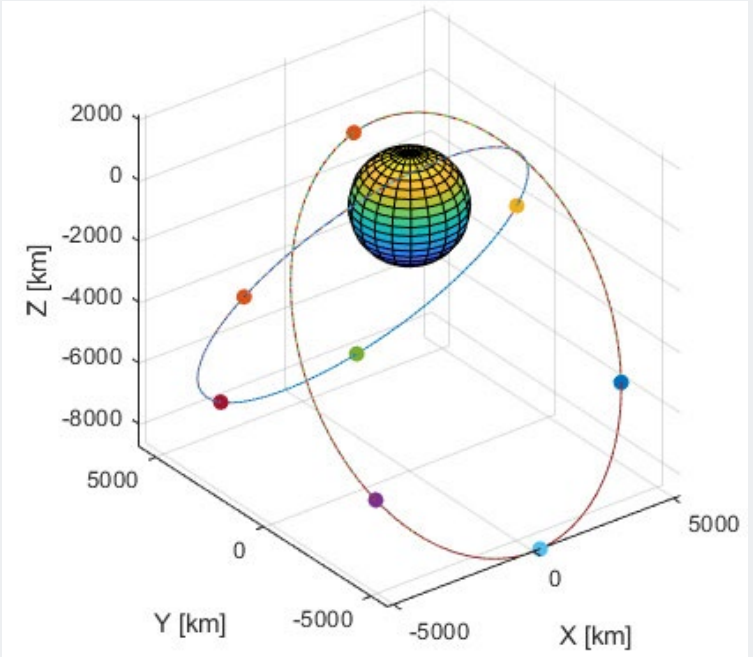
6.　月測位信号シミュレータ

月測位信号シミュレータの概要

- 現時点では仮に,
  - 均一な球である月を想定
  - 衛星軌道モデルはケプラー軌道モデル
  - ELFO軌道を航法メッセージ生成に使用

- 受信機位置は
  月南極・シャクルトンクレーターを想定

- 生成したベースバンド信号は
  ファイルとして出力
- 実時間の10倍以上の生成速度

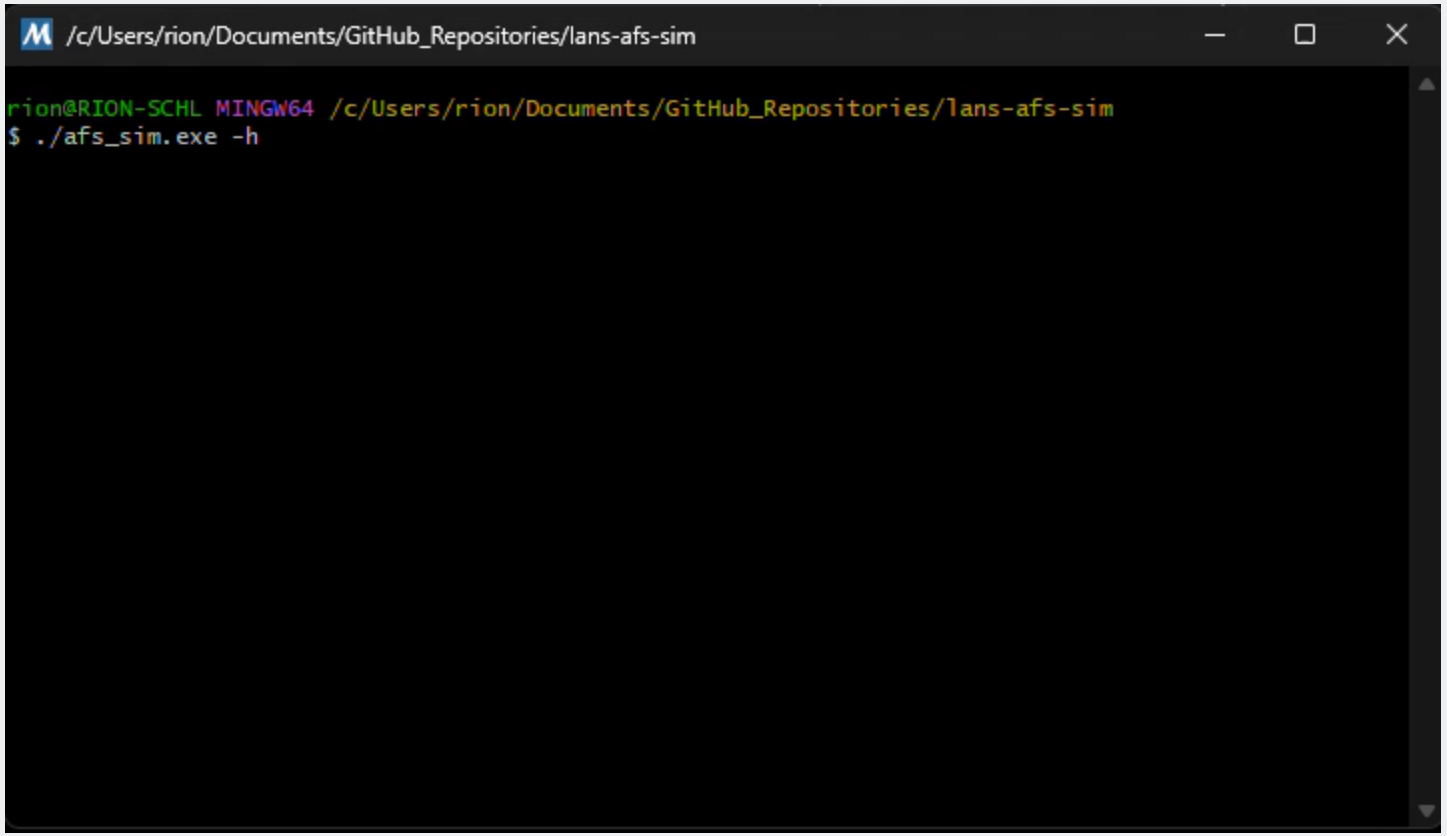


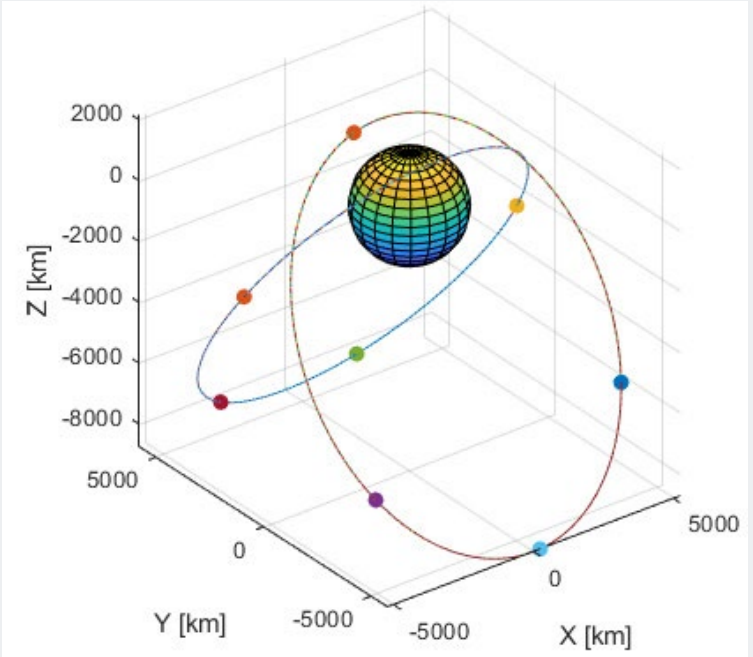
JAXAが提案するELFO軌道

6.　月測位信号シミュレータ

月測位信号シミュレータのデモンストレーション

- デモンストレーションを動画で紹介





JAXAが提案するELFO軌道

7.　月測位受信機

PocketSDRの概要

- 高須知二氏の開発によるオープンソースGNSS SDR フレームワーク
  https://github.com/tomojitakasu/PocketSDR
- GNSS信号の捕捉・追尾・航法メッセージデコード，測位演算まで
  一連の処理をソフトウェアで実現

- SIMD命令の活用
  - 2ビット量子化されたI/Qサンプルデータの並列処理により相関処理などを高速化
    Intel/AMD系CPU向けのAVX2命令，ARM系CPU向けのNEON命令に対応

- 高性能なPCだけでなく，Raspberry Pi 5のような
  組み込みプラットフォームでもリアルタイム動作実績あり

7.　月測位受信機

月測位受信機の概要

- 開発ベース：PocketSDR
  - 既存のアーキテクチャを活用
    短期間のプロトタイプ開発を実現
  - 教育・研究向けに開発されており，拡張性も高い
  - 将来的な月面での実証をターゲット
    組み込み動作実績も

- PocketSDRはGNSS(L-band)用FEも展開
  AD社 MAX2771 搭載
  - 2 bit ADC出力
  - 2CH対応FEは約2万円で購入可能
  - リアルタイム動作検証に使用

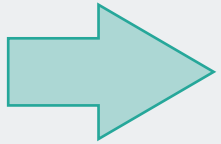


Raspberry Pi 5 とPocketSDR FE

7.　月測位受信機

AFS対応のための主な改修点

- 拡散符号生成器のAFSパラメータ対応
  - AFS-IはGPS L1C/Aと同様
    - 10段LFSR -> 11段LFSR
  - AFS-QはGPS L1CPと同様



信号捕捉までは
少ない改修で実現可能

- 航法データのデコーダ
  - SP: フレーム同期，SB1: BCHデコード，SB2: LDPCデコード・CRC
- 月座標系での簡易な測位演算機能の実装
  - RTKLIB(GNSS用ライブラリ)を代替

- LSISの仕様はほぼ実装

8.　受信機 検証環境の構成

検証シナリオ

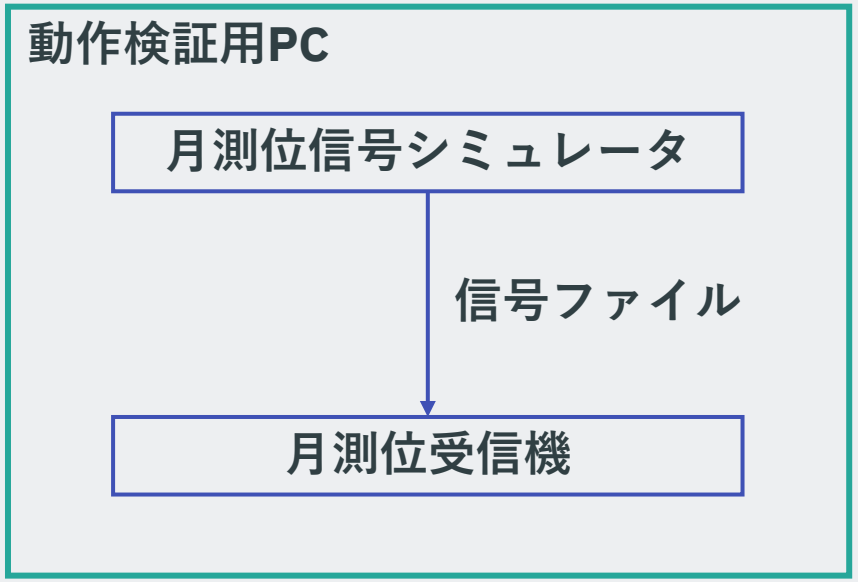
- 衛星コンステレーション：ELFO 衛星8機 (2軌道面4機)
- 受信機位置：月南極域 シャクルトンクレーター

- オフライン処理検証　：ファイルを直接PocketSDRに渡す
- リアルタイム処理検証：bladeRFを使用し，ベースバンド信号を送受信

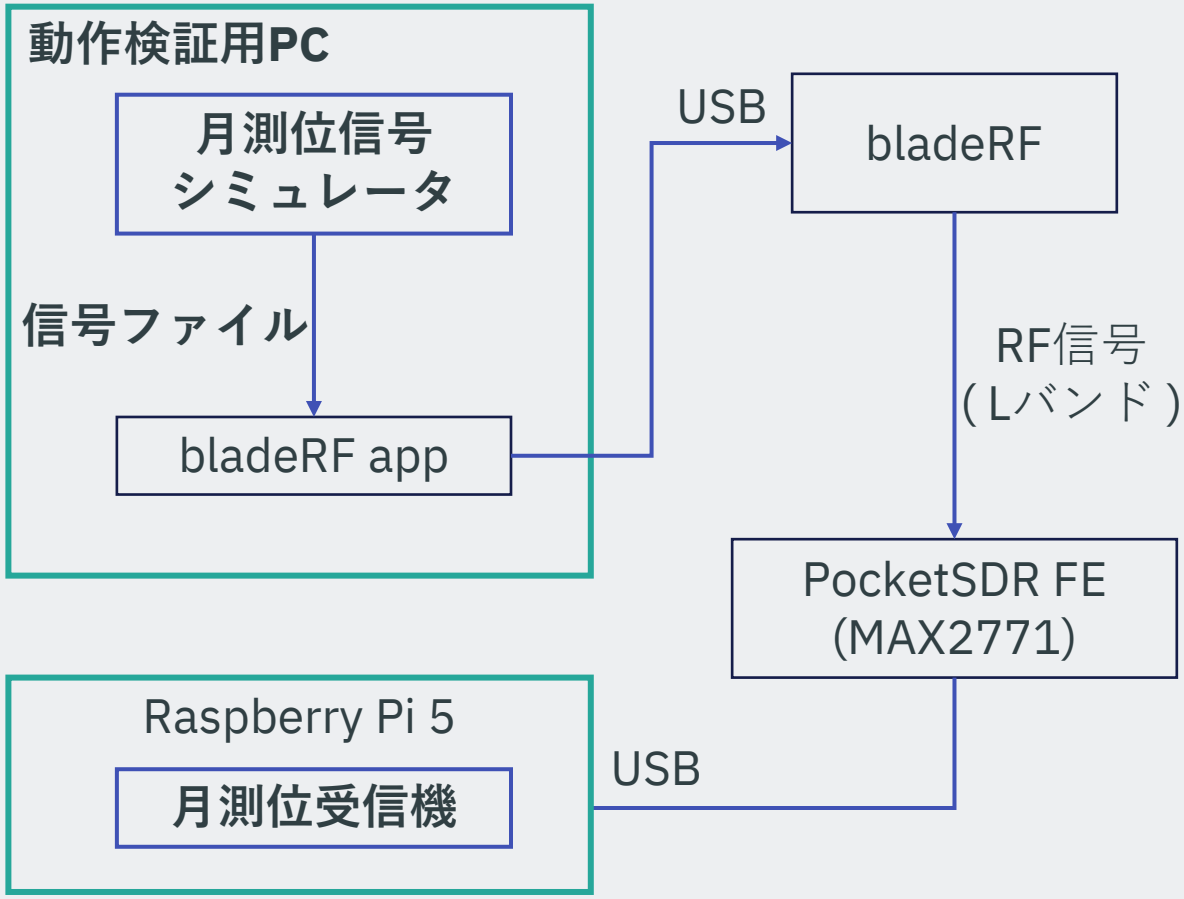
後ほど実際にハードウェアを使用した動作デモを行います

8.　受信機 検証環境の構成

オフライン検証環境の構成



リアルタイム検証環境の構成



※リアルタイム検証では
S-Band FE 準備中のため,
L-Band(1575.42 MHz)で検証

9. オフライン処理による検証

オフライン処理の流れ

1. 月測位信号シミュレータでベースバンド信号ファイルを生成
2. PocketSDRにファイルを入力し，測位演算

衛星捕捉・追尾の結果

- 月測位受信機の機能全体をオフラインで確認した
- 信号の捕捉・追尾，測位演算まで動作

```
Galileo@GPSLAB MINGW64 ~/PocketSDR/PocketSDR_AFS/app/pocket_trk
$ ./pocket_trk.exe -sig AFSD -prn 2-8 -f 12 ~/lans-afs-sim/test.bin
FFTW wisdom import error ../python/fftw_wisdom.txt
 2023-08-30 16:45:29.002 -89.6599650  129.1983315   101.79  7/ 7 FIX
 CH RF   SAT   SIG PRN  LOCK(s) C/N0 (dB-Hz)          COFF(ms) DOP(Hz)
  1  1   L02  AFSD   2    41.60 41.2 |||||||       0.6382863 -2376.2
  2  1   L03  AFSD   3    41.41 39.5 ||||||        0.2709377     6.0
  3  1   L04  AFSD   4    41.05 41.5 |||||||       0.5857123  2386.0
  4  1   L05  AFSD   5    40.88 43.5 ||||||||      1.9304659 -3009.5
  5  1   L06  AFSD   6    40.71 39.8 ||||||        0.8577432 -1173.4
  6  1   L07  AFSD   7    40.54 39.9 ||||||        0.8057977  1195.3
  7  1   L08  AFSD   8    40.35 44.2 |||||||||     1.7888383  3005.1
```

オフライン検証時のスクリーンショット

	ユーザー位置	測位結果
緯度	-89.66	-89.6599650
経度	129.20	129.1983315
高度	100.0	101.79

測位結果はシミュレーションで指定した
ユーザー位置と一致

10. リアルタイム処理による検証

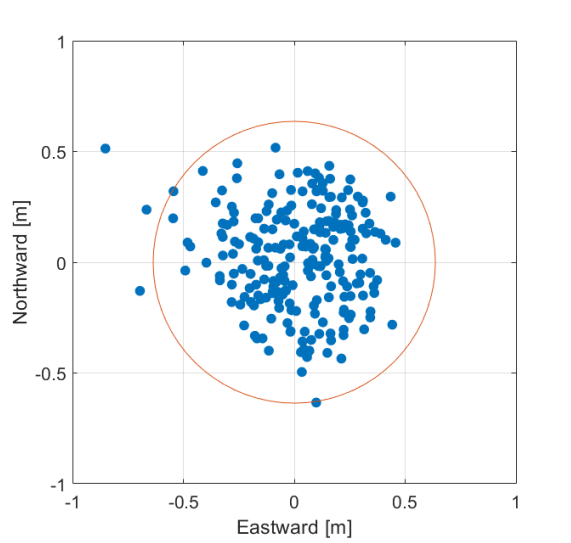
リアルタイム処理の流れ

1. 月測位信号シミュレータでベースバンド信号ファイルを生成
2. bleadeRFを用いてベースバンド信号ファイルを送信 (1575.42 MHz)
3. PocketSDR FEを介して受信し，PocketSDR (pocket_trk)で信号処理

衛星捕捉・追尾の結果

- Raspberry Pi 5でリアルタイム追尾と測位演算を確認
- 測位精度は，水平方向に約0.64メートル (2drms)

- Raspberry Pi 5のCPU使用率は約64 % (4コア400% 中)
  使用率は1コア未満
  → 将来的な機能拡張のための処理能力に余裕



水平方向の測位誤差

11. 今後の展望

ソフトウェア・ハードウェア面での改良

- ARM向けSIMD命令を活用，信号処理の効率を向上させる
- 汎用フロントエンドへの対応作業を進行
  - Sバンド対応RFフロントエンドによる本来の周波数帯での検証
  - LバンドだけでなくSバンド(LANS-AFS)，C-band(LEO-PNT)にも対応可能
  - LEO-PNT受信機のプロトタイピングも可能

月面環境を想定したもの

- 月面の課題(レゴリスによるマルチパス，クレーターなどによる信号遮蔽等)
  月環境に合わせた測位演算手法の導入

11. 今後の展望

システム全体について

- 月探査ローバーなどへ搭載可能な，スタンドアローンで動作する小型月測位受信機の実現を目指す

- ~~各ソフトウェアのオープンソース公開予定~~
- **2025年5月27日にGitHub上で公開**
  - 信号シミュレータ (LANS-AFS-SIM) :
    https://github.com/osqzss/LANS-AFS-SIM
  - 月測位受信機(PocketSDR-AFS) :
    https://github.com/osqzss/PocketSDR-AFS

12. まとめ

- LANS-AFSに対応したSDRベースの月測位受信機の開発を実施
- 受信機検証のための月測位信号シミュレータの開発を実施

- LANS-AFSの捕捉，追尾，測位演算といった受信機機能を実装・動作確認
- 7機の可視衛星を用いた測位計算
  シミュレーションで設定したユーザー位置に対し，
  水平方向精度 約0.64メートル (2drms)

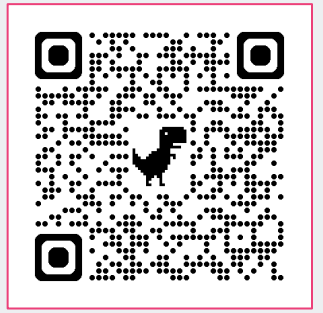
- Raspberry Pi 5の処理能力に，将来的な機能拡張の余裕があることを確認

リンク集

- 月測位信号シミュレータ LANS-AFS-SIM
  https://github.com/osqzss/LANS-AFS-SIM



- 月測位受信機 PocketSDR-AFS
  https://github.com/osqzss/PocketSDR-AFS



- PocketSDR FE 2CH
  https://rtklab.booth.pm/items/5673546

