

*Application Note***IWRL6432AOP 向けカスタム ステアリング ベクトル**

Nathan Block

概要

IWRL6432AOP は、60GHz 放射線を使用する、低消費電力の高集積レーダーチップであり、広い視野で人間と人間以外のターゲットの検出、位置特定、追跡、分類を効果的に行います。IWRL6432AOP は、ビデオカメラの電源を投入したり、エアコンをオンにしたり、ロボットが誰かの存在を検出した際にロボットが人と衝突したりするのを防止したりできます。ただし、占有を高精度で検出するには、3D 空間で IWRL6432AOP によって人々を効果的に位置識別できるようにする必要があります。TI は、この目標を実現するために、2 つの到來角 (AOA) 推定アルゴリズムを提供しています。電力に制約のあるアプリケーションの場合、FFT ビームフォーミングアルゴリズムは、 $\pm 60^\circ$ の FoV (視野角) の平均絶対誤差 8.5° で、AOA 推定結果を実現します。また、電力バジェットがより高いデバイスの場合、ステアリング ベクトル ビームフォーミングアルゴリズムは、 $\pm 70^\circ$ の FOV 内で 2.9° の平均絶対誤差を達成し、検出されたポイントあたり 0.15 ミリ秒の追加時間を要します。このアプリケーション ノートでは、両方の方法の背後にある理論、複数の方法のトレードオフ、ラボおよび屋外で手法をテストした場合の結果について説明します。

目次

1 はじめに	2
1.1 到來角推定理論:FFT ビームフォーマ.....	2
1.2 到來角推定理論:ステアリング ベクトル.....	3
2 追加情報	4
2.1 測定手順.....	4
2.2 テスト結果.....	5
2.3 処理時間.....	7
2.4 使用法.....	8
2.5 他のプラットフォームへの拡張.....	9
3 まとめ	10
4 参考資料	10
5 付録	11
5.1 各構成ファイルのチャーピ パラメータ.....	11
5.2 ヒト被験者試験のためのポイントクラウド データ.....	11

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

1.1 到来角推定理論: FFT ビームフォーマ

『ミリ波レーダーセンサの基礎』の理論に基づいて、レーダーの FOV 内の物体の到来角は、式 1 および式 2 を使用して推定できます。

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (1)$$

すべてのアンテナが平面波フロントで整列している場合、基本的な形状は $\Delta d = l\sin(\theta)$ であることを示しています

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi}{2\pi l}\right) \quad (2)$$

実際には、MIMO システムは 2 つ以上のアンテナを使用するため、位相 ($\Delta\Phi$) の変化は 2 つのアンテナ間の位相の変化だけでなく、N アンテナ間の位相の変化でもあります。空間全体の位相の変化を空間周波数 (Ω) と呼び、FFT を用いて推定することができます。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi}{2\pi l}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\omega}{2\pi l}\right) \quad (3)$$

FFT は、(X 軸に見られる) 候補角度の数を増やすために、多くの場合、多数のゼロをパディングします。その結果、角度 FFT では多くの場合、広いピークが生成されます。したがって、物体の到来角を推定するために、レーダーはこれらの異なる候補位置すべてにおける FFT の大きさを比較し、角度スペクトルの最大値に対応するピークを選択します。下の図はこれを示しており、大きさが最も高いため、選択されたピークはインデックス 11 にあります。

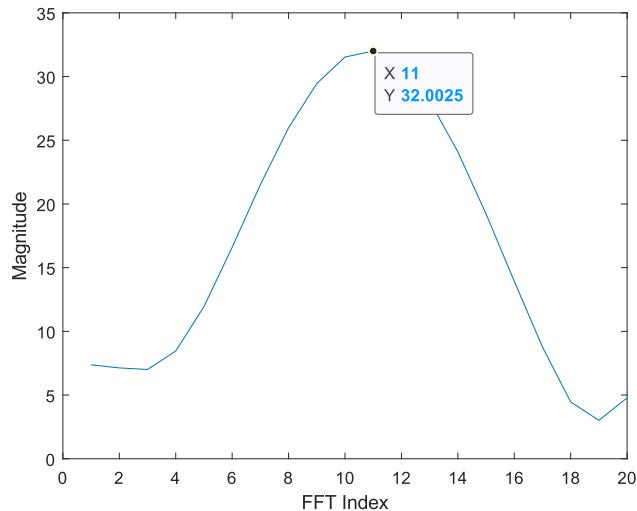


図 1-1. インデックス 11 での最大ピークによるプロード FFT スペクトル

IWR6432 では、この FFT の計算は、レーダー ハードウェア アクセラレータを使用して行われます。ただしこれは、すべてのアンテナの受信フェーズを持つ FFT マトリクスの行列ベクトル積と基本的に等価です。選択する AOA は、式 4 の a_i の最大値に対応する角度です。

$$\begin{pmatrix} w^0 & w^0 & \dots & w^0 \\ w^0 & \omega^1 & \dots & \omega^{N-1} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ w^0 & \omega^{N-1} & \dots & \omega^{(N-1)(N-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{N-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\omega = e^{-j2\pi} \quad (5)$$

出力相関ベクトル \mathbf{x} のベクトルから、 x_i の最大値に対応する FFT インデックスを選択します。

$$idx_{est} = argmax_i(a_i) \quad (6)$$

次に、AOA の式を使用して推定される AOA θ_{est} を計算します。

$$if\left(idx_{est} \leq \frac{N}{2}\right) \rightarrow \theta_{est} = \arcsin\left(\frac{2 \times idx_{est}}{N}\right) \quad (7)$$

$$if\left(idx_{est} > \frac{N}{2}\right) \rightarrow \theta_{est} = \arcsin\left(\frac{N - 2 \times idx_{est}}{N}\right) \quad (8)$$

1.2 到来角推定理論: ステアリング ベクトル

前述の式と FFT は、さまざまな物体の到来角の推定値です。レーダーまたはアンテナに非線形性がある場合、または個別のアンテナごとにゲイン / 位相の不一致がある場合、前述の FFT マトリクスと式は、物体の到来角を正確には推定できません。ここでの別の設計方法は、すべての潜在的な到来角にわたって掃引されたターゲットのレーダー信号の反射位相を測定し、これらの係数をグラウンドトゥルースベクトルとして使用し、実験的に FFT マトリクスを再計算することです。これは、IWRL6432AOP のステアリング ベクトルアルゴリズムと呼ばれるものです。

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1,1} & x_{N-1,2} & \cdots & x_{N-1,N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \dots \\ \phi_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{N-1} \end{pmatrix}$$

$$idx_{est} = argmax_i(a_i) \quad (9)$$

収集されたデータセット (FOV を通常の増分でスイープ) に基づいて、 θ_{est} は、A インデックスを θ インデックスにマッピングする参照テーブルで参照されます。

表 1-1. ステアリング ベクトル参照テーブルの例

a	θ
0	-80°
1	-75°
2	-70°
...	...
N-1	80°

2 追加情報

2.1 測定手順

ステアリングベクトルの係数マトリクスを計算するために、テキサス・インストゥルメンツでは複数の PCB 設計、単位、温度について IWRL6432 の反射位相を測定しました。TI は、[ミリボックス](#)の小型無響室と、レーダーから既知の距離に配置したコーナー反射器を使用し、レーダーデバイスを水平角度と垂直角度の掃引で回転させて、各角度で返された ADC データを記録しました。

図 2-1 と図 2-2 に、TI が使用した、チャンバーの一方の端にレーダー、もう一方の端にコーナー リフレクタを配置したセットアップを示します。

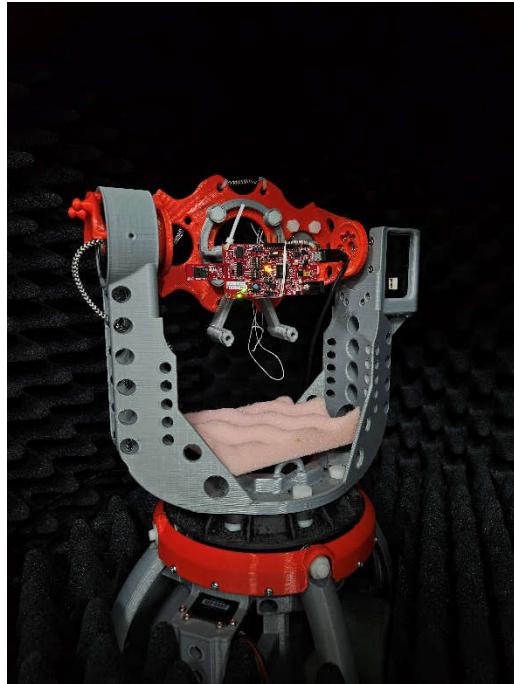


図 2-1. ミリボックス チャンバーの IWRL6432AOPEVM

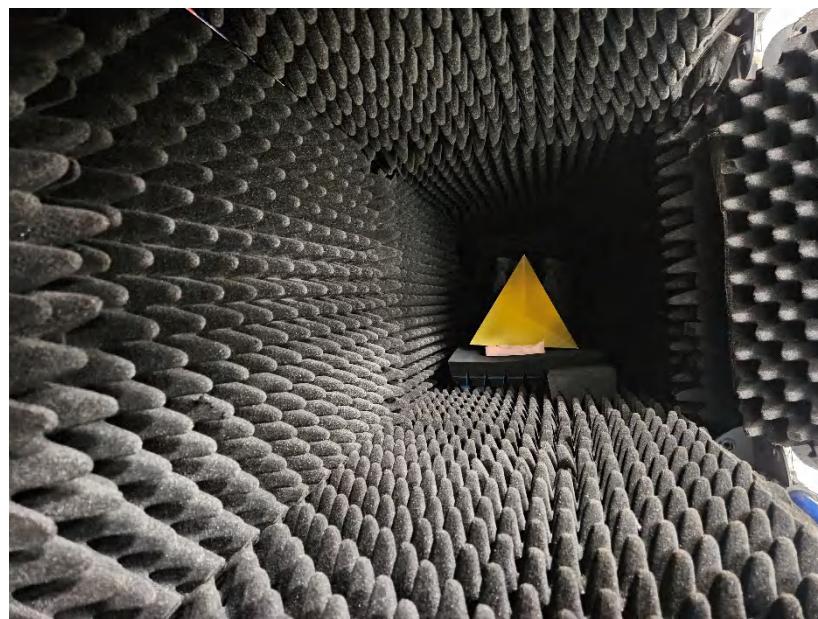


図 2-2. ミリボックス チャンバーの反対側の端にあるコーナー リフレクタ

2.2 テスト結果

2.2.1 コーナー リフレクタ ターゲットでの無響室試験

ミリ波ックスの測定結果を使用して、TI は到來角を高い精度でデコードするステアリング ベクトル アルゴリズムを開発し、さまざまなセットの IWRL6432AOPEVM デバイスのアルゴリズムで性能を検証しました。TI では、さまざまな帯域幅と開始周波数に関する 4 種類のチャープ プロファイルにわたってこれらのデバイスをテストしました。最初はコーナー反射器の無響室で、その後は屋外で、レーダーの方向と方向を歩いている実在の人物でテストしました。下の表にチャープ パラメータを示します。

ステアリング ベクトル アルゴリズムは、IWRL6432AOP デバイスの 57 ~ 63.5GHz の帯域幅全体で動作することに注意してください。以下のチャープは、この帯域内の電位チャープのサンプルとして選択されたものです。

表 2-1. テストに使用したチャープ帯域幅

構成 #	開始周波数 (GHz)	終了周波数 (GHz)
1	60.5	61.35
2	57	57.85
3	58.5	61.05
4	60	63.4

無響室では、ステアリング ベクトル アルゴリズムにより、視野全体にわたって AOA 推定誤差が低減されました。

表 2-2. FFT および SV アルゴリズムでの AOA 誤差と方位角との関係、無響室におけるコーナー反射器、仰角 = 0°

	-70°	-60°	-45°	-30°	0°	+30°	+45°	+60°	+70°
CFG #1 (FFT)	44.5°	-5.2°	-3.4°	-6.8°	-0.5°	-0.9°	-5.8°	12.1°	-13.2°
Cfg #1 (ステアリング ベクトル)	1.2°	1.7°	3.9°	-1.0°	0.2°	1.6°	3.1°	10.4°	-4.9°
Cfg #2 (FFT)	-20°	-10.4°	-4.4°	-6.9°	-2.9°	-2.5°	-5.3°	-10.1°	-10°
Cfg #2 (ステアリング ベクトル)	0.4°	-3.2°	-1.4°	-3.1°	-1.8°	0.2°	4.1°	-5.3°	-6.7°
Cfg #3 (FFT)	-9.5°	-1.2°	-6.2°	-6.0°	-1.9°	-1.3°	-2.7°	-13.1°	-15.2°
Cfg #3 (ステアリング ベクトル)	7.4°	5.7°	1.5°	-0.1°	0.1°	5.4°	5.6°	0.7°	-3.9°
Cfg #4 (FFT)	-4°	-4.8°	-4.1°	-6.2°	-1.4°	-1.2°	-5.0°	-45.4°	-13.8°
Cfg #4 (ステアリング ベクトル)	3°	1.7°	1.3°	-1°	-0.1°	1.9°	4.5°	1.7°	-3.8°

2.2.2 ヒトを被験者とした屋外試験

ステアリング ベクトル パッケージが現実的なシナリオでも AOA を正確に推定できることを確認するために、同様の実験が、屋外環境でヒトを被験者として実施されました。実験者は既知の一連の角度でレーダーに向かって歩いたりレーダーから離れたりして、各試験のために点群を集めました。すべての点の平均 AOA 誤差を図 2-3 と図 2-3 に示し、すべての試験のプロットを付録に示しました。

表 2-3. FFT および SV アルゴリズムでの AOA 誤差と方位角との関係、ヒト被験者の歩行屋外配置

	-70°	-60°	-45°	-30°	0°	30°	45°	60°	70°
Cfg #1 (FFT)	-12.5°	5.5°	6.6°	3.7°	1.5°	2.2°	7.1°	6.3°	-12.5°
Cfg #1 (ステアリング ベクトル)	-6.5°	-2.6°	-2.3°	-2.1°	1.4°	0.8°	-0.7°	3.1°	-6.5°
Cfg #2 (FFT)	7.4°	9.9°	5.3°	6.0°	5.0°	2.0°	8.5°	5.7°	10.8°
Cfg #2 (ステアリング ベクトル)	0.9°	4.2°	2.1°	3.3°	3.5°	-2.1°	-0.6°	-0.6°	3.2°
Cfg #3 (FFT)	2.4°	11.1°	10.5°	6.8°	3.5°	1.2°	9.3°	10.1°	2.4°
Cfg #3 (ステアリング ベクトル)	-4.2°	0.3°	2.3°	0.2°	2.4°	-0.5°	1.4°	1.2°	-4.2°
Cfg #4 (FFT)	-16.7°	6.7°	6.1°	5.3°	3.6°	3.8°	9.7°	8.7°	9.4°
Cfg #4 (ステアリング ベクトル)	-4.1°	-1.2°	-3.8°	-0.1°	2.8°	1.7°	0.3°	0.1°	2.7°

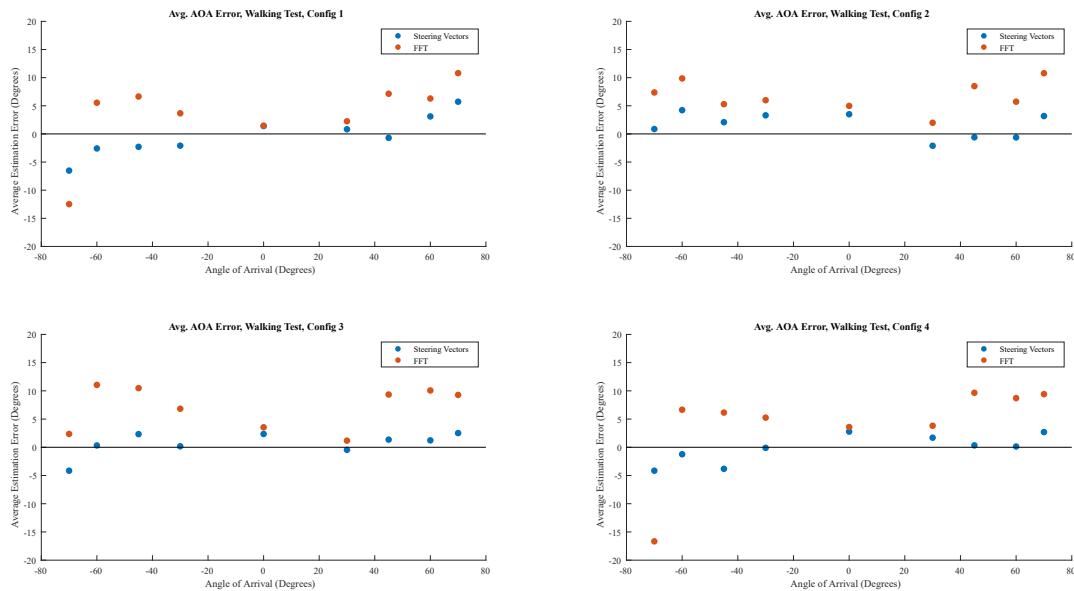


図 2-3. 歩行テスト AOA 誤差

図 2-4 に、データのキャプチャに使用する設定を示します。

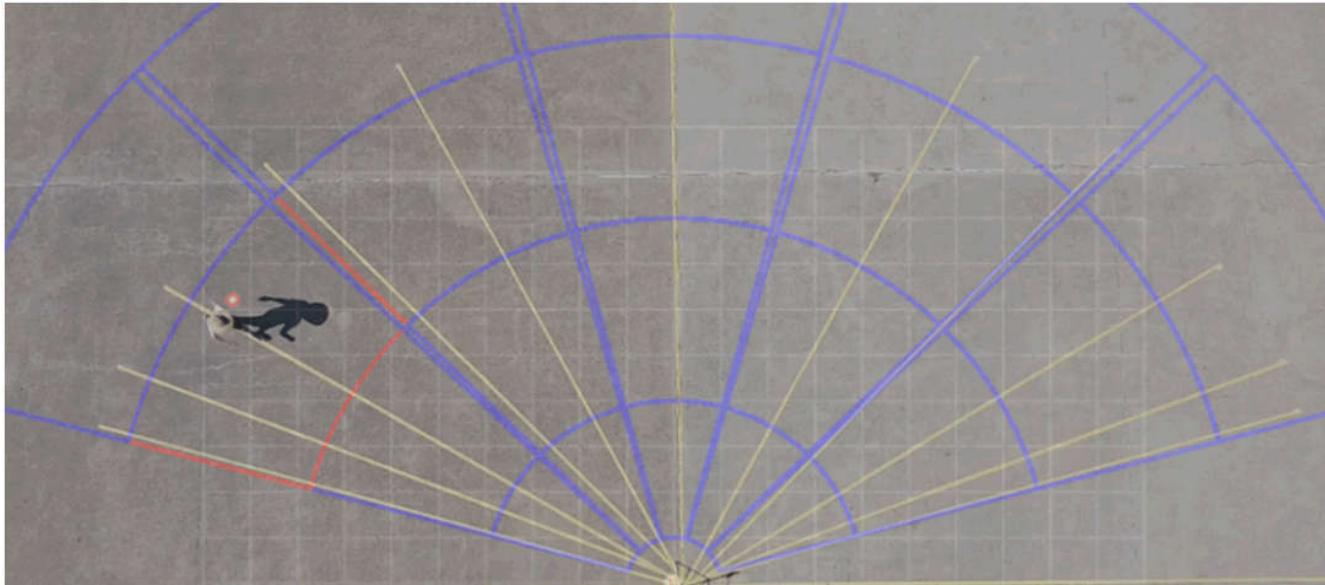


図 2-4. 歩行テスト環境 (鳥瞰図)

2.3 処理時間

ステアリング ベクトル パッケージの使用による AOA の改善には、最高の性能を得るために追加の処理が必要です。ステアリング ベクトル パッケージは、検出されたポイントがある範囲のビンでのみ実行されるため、処理時間の増加は、検出されたポイントごとに定量化できます。このタイミングの内訳を以下に示します。その結果、検出されたポイントあたり約 $150\mu\text{sec}$ となり、初期化のために $676\mu\text{sec}$ の固定処理時間が追加されます。この結果、デバイスがディープ スリープ モード ($0.48 \sim 0.67\text{mW}$) ではなく、処理に費やす時間が長くなるため、消費電力が増加します ($80 \sim 120\text{mW}$)。消費電力増加の正確な量を測定でき、これはチャーブ パラメータ、フレーム レート、スリープ設定に依存します。

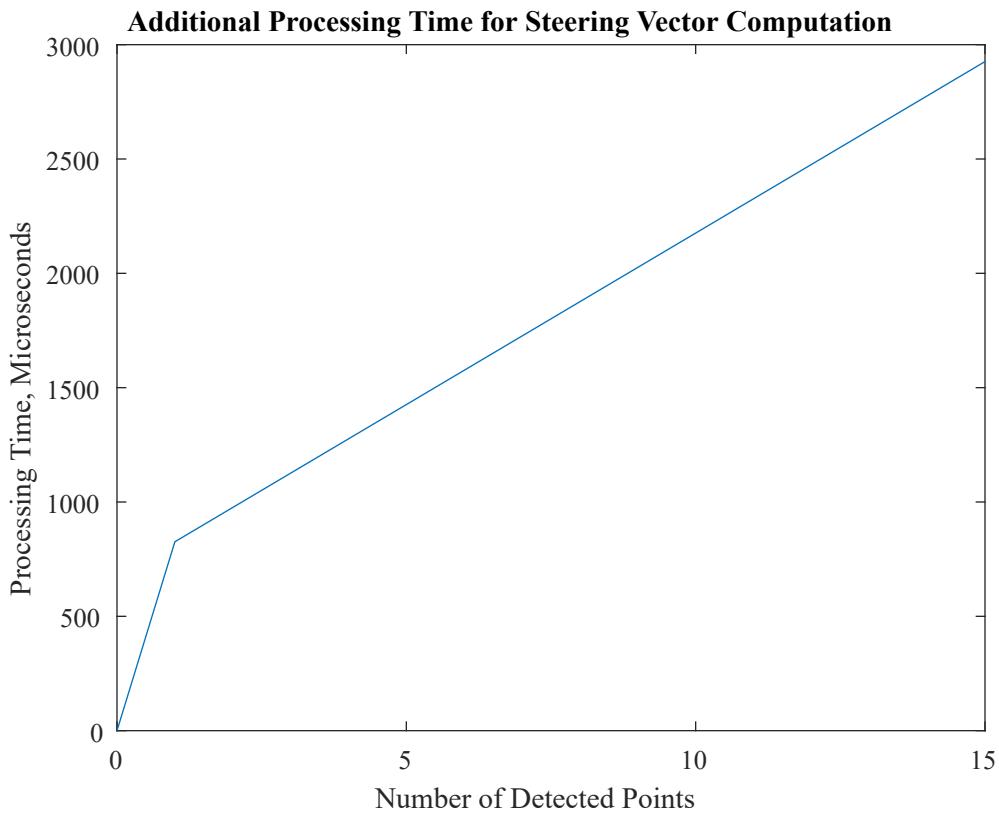


図 2-5. 処理時間と検出されたポイント数との関係

2.4 使用法

TI は、指定の帯域幅とチャーブ周波数を使用して、IWRL6432AOP のステアリング ベクトル係数を計算するソフトウェア ツールを開発しました。このツールは、MMWAVE-L-SDK の `tools/steering_vector_generation_tool/` にあります。次のコマンドを使用して実行できます。

```
generateSteeringVectors.exe --filename
"path\to\config.cfg" --azimSpacing %Azimuth_Spacing% --elevSpacing
%Elevation_Spacing%
```

使用法の詳細については、同じフォルダの `readme` を参照してください。

ステアリング ベクトル ファイル (`aoasv_table.c`) が生成されると、CCS プロジェクトで次の 2 つのいずれかの方法で使用できます。

1. これは、CCS プロジェクトに (AOASVCDPU フォルダ内のすべてのファイルとともに) コピーされ、CCS プロジェクトの一部としてビルドできます。ユーザーは、.c ファイルの名前を `aoasv_table6432.c` から `aoasv_table.c` に変更して、AOASVCDPU および CCS プロジェクトの一部のファイル パスを新しい DPU を指すよう変更できます。
MMWAVE-L-SDK 5.5.4 では、`motion_detect.h` にある DPU フォルダ構造を模倣するために、`datapath/dpu/aoasvcproc/v0/` というフォルダが必要になります

```
C motion_detect.h X
ti > MMWAVE_L_SDK_05_05_04_00 > examples > mmw_demo > motion_and_presence_de
40 #include "task.h"
41
42 #include <datapath/dpu/rangeproc/v0/rangeprochwa.h>
43 #include <datapath/dpu/cfarproc/v0/cfarprochwa.h>
44 #include <datapath/dpu/aoasvproc/v0/aoasv_table.h>
45 #include <datapath/dpu/udopproc/v0/udopproc.h>
46 #include <datapath/dpu/mpdproc/v0/mpdproc.h>
47 #include <datapath/dpu/trackerproc/v0/trackerproc.h>
48
```

図 2-6. motion_detect.h の DPU 構造

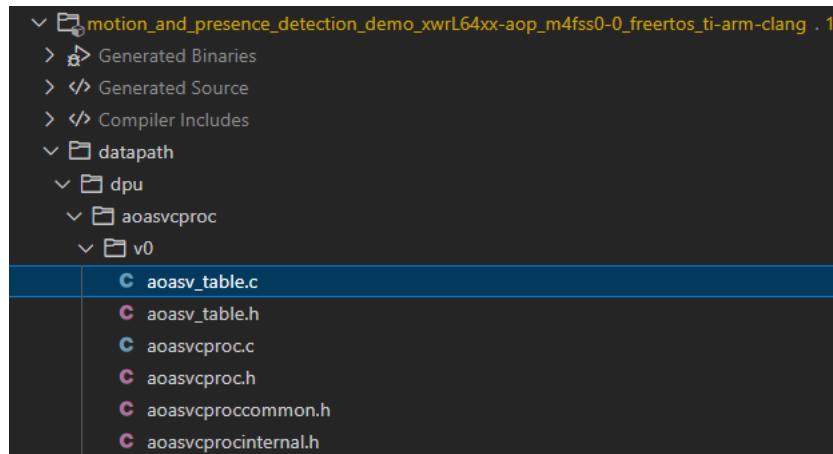


図 2-7. AOASVCDPU を含む Motion_and_Presence プロジェクトのフォルダ構造

2. これは、データパス DPU の一部として makefile を使用してビルドし、CCS プロジェクトにリンクすることができます。

2.5 他のプラットフォームへの拡張

テキサス・インストゥルメンツが提供するステアリング ベクトル パッケージは、IWRL6432AOP デバイスのみに関連があります。これは、係数が、IWRL6432AOP のアンテナ設計に固有のゲインと位相の不一致から求められるためです。これらの係数は、IWRL6432 の他のバリエーション (FCCSP および WCSP パッケージ)、AWRL6432、IWRL1432、AWRL1432 のいずれとも互換性がありません。TI では、特定の基板設計および筐体向けに、ステアリング ベクトル係数を再設定することはサポートしていません。

3 まとめ

IWRL6432AOP には 2 つの角度エスティメータ方式があります。FFT 角度推定アルゴリズムは、迅速な処理時間を達成するうえで、妥当な視野内で良好な角度推定性能を達成できます。それに対し、ステアリング ベクトル角度推定アルゴリズムは、より広い視野角にわたって角度推定を改善し、処理時間が長くなる代わりに、より広い視野角にわたって角度推定を改善しています。広い帯域幅と周波数範囲にわたって、静止したターゲットと歩行者の被験者に対してステアリング ベクトルアルゴリズムをテストし、多くの条件下で堅牢な性能を保証しました。

どちらの角度推定アルゴリズムでも、設計者は IWRL6432 を使用して長距離で人や物体を検出できます。今後、これらのデバイスをマルチパス検出アーキテクチャで組み合わせて使用することもできます。FFT 角度推定手法を使用すると、視野内で人が検出されない場合のレーダーの消費電力を低減できます。また、検出時に、ステアリング ベクトル アルゴリズムで、より微細な位置識別を実現し、検出の位置に応じてレーダーが適切に応答することを確認できます。

4 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、『[ミリ波レーダー センサの基礎](#)』、マーケティング ホワイト ペーパー。

5 付録

5.1 各構成ファイルのチャープ パラメータ

表 5-1. 各構成の完全なチャープ パラメータ

構成 1	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 12.5 60.5 frameCfg 2 0 280 8 500 0
構成 2	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 12.5 57.0 frameCfg 2 0 280 8 500 0
構成 3	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 37.5 58.5 frameCfg 2 0 280 8 500 0
構成 4	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 80 58 frameCfg 2 0 280 8 500 0

5.2 ヒト被験者試験のためのポイント クラウド データ

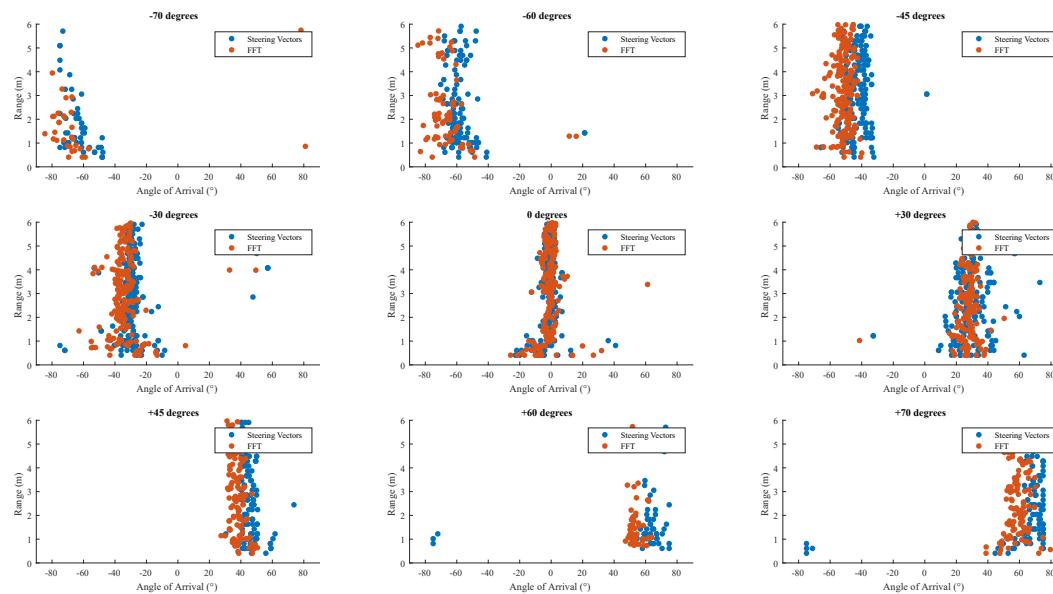


図 5-1. 歩行テスト、すべてのポイントを検出、構成 1

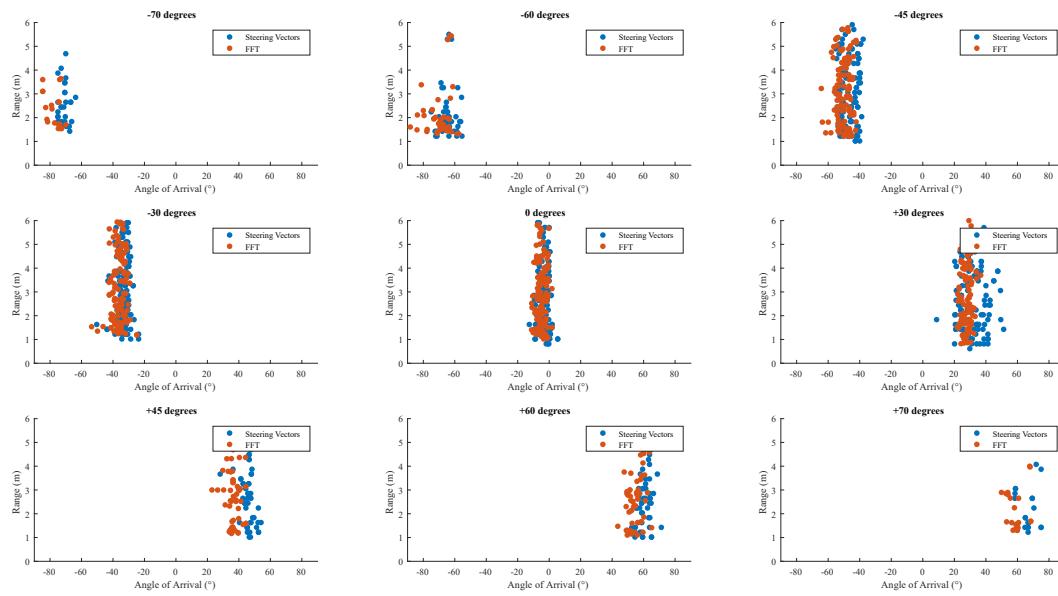


図 5-2. 歩行テスト、すべてのポイントを検出、構成 2

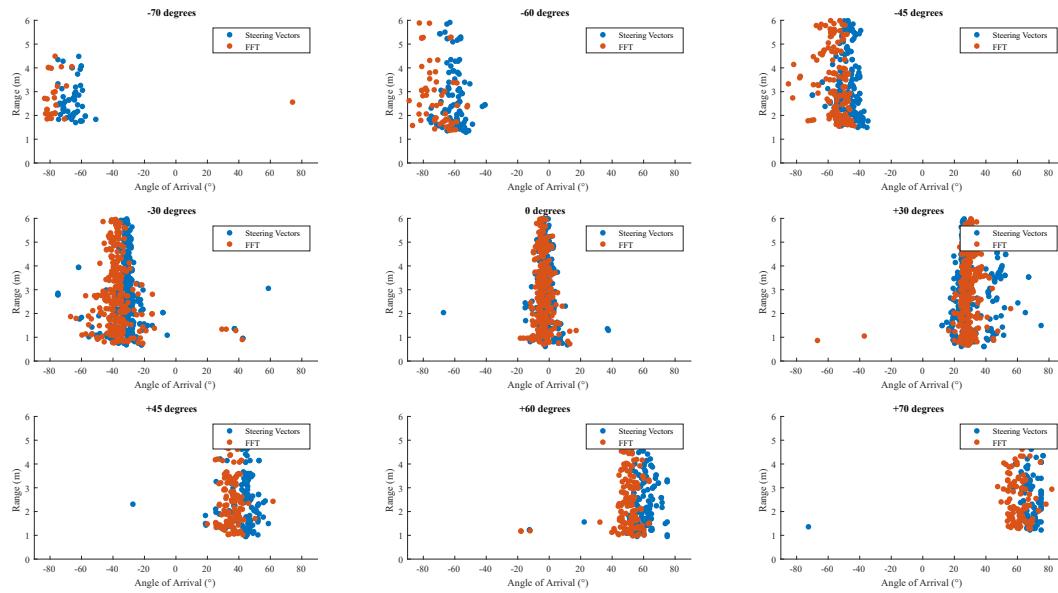


図 5-3. 歩行テスト、すべてのポイントを検出、構成 3

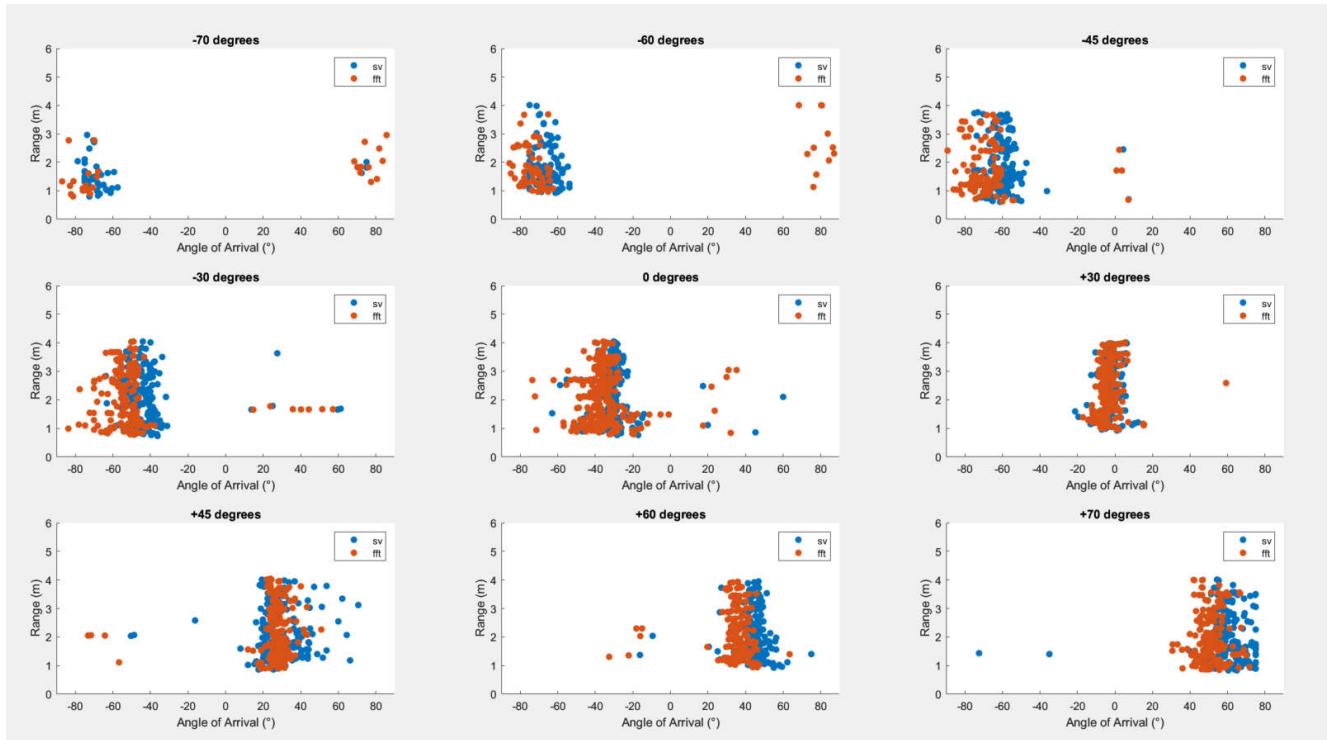


図 5-4. 歩行テスト、すべてのポイントを検出、構成 4

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1)お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2)お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3)お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または ti.com やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated