

ロボット・アプリケーションでの ミリ波レーダ・センサの活用



Dennis Barrett

Product marketing manager

Adrian Alvarez

Application engineer co-op

Texas Instruments

概要

ロボットのイメージを思い浮かべるとき、目に見えるコイルやワイヤを収容したハーネスを取り付けた、重そうな機械製のアームが工場の床に沿って移動し、溶接の火花が飛び散る、といった光景を連想する方もいらっしゃるでしょうか。

一方、ポップ・カルチャーやSFが描くロボットは、このような重々しい機械とは大きく異なり、あらゆる場所で毎日の生活を支援する多数のロボットが活躍する近未来を示しています。

現在、AI(人工知能)テクノロジーの分野で見られる革新は、サービス・ロボットの進歩を促しており、無人飛行機械(ドローン)や自動運転自動車の市場規模は2016年の310億ドル(約3兆4,000億円)から2020年までに2,370億ドル(約26兆円)にまで成長する見通しです^[1]。

ロボット・テクノロジーが進歩するにつれて、それを補完するセンサ・テクノロジーも進歩しています。変化を続ける統一的な管理がなされていない環境にロボット・システムを導入する際に、ヒトの五感によく似た形で複数のセンサ・テクノロジーを組み合わせると、最善の結果が得られます。

ロボット・センシングに登場した比較的新しいテクノロジーの1つがCMOSミリ波レーダ・センサです。

ロボット分野におけるセンサ・テクノロジー

ロボット分野で見受けられるセンサ・テクノロジーに該当するのは、力(フォース)センサやトルク・センサ、タッチ・センサ、1D/2D赤外線(IR)レンジ・ファインダー、3Dタイム・オブ・フライト(ToF) LIDARセンサ、カメラ、慣性計測ユニット(IMU)、GPSなどです。

CMOSミリ波センサを採用すると、視野角に入る物体の距離測定に加えて、各種障害物の相対速度も測定できます。

このようなセンシング・テクノロジーにはいずれも、表1に示すように利点と欠点があります。





Sensors	Detection range	Detection angle	Range resolution	Detectable information	Bad weather	Night operation	Detection performance
 mmWave	Long	Narrow and wide	Good	Velocity, range, angle	Good	Yes	Robust and stable
 Camera	Medium	Medium	Medium	Target classification	Poor	No	Complexity to calculate object coordinates
 LIDAR	Long	Narrow and wide	Good	Velocity, range, angle	Poor	No	Poor in bad weather
 Ultrasonic	Short	Wide	Good	Range	Poor	No	Short-range applications

表 1: センサ・テクノロジーの比較。

ビジョン(有視界) ベースや LIDAR ベースのセンサに比べて、ミリ波センサの最大の利点の1つは、雨、ほこり、煙、霧、霜のような環境条件に対する耐性です。

加えて、ミリ波センサは、完全な闇夜や、直射日光の下でも動作できます。

外部に面したレンズ、開口部、センサ露出面のいずれも設けずに、筐体プラスチックの内部に直接設置できるので、ミリ波レーダ・センサは非常に堅牢で、Ingress Protection (IP、イングレス・プロテクション、保護等級) 69K の規格を満たすことができます。

また、TI のミリ波センサには、小型で軽量という特長もあり、小型 LIDAR レンジ・ファインダーに比べても、サイズが 1/3、重量が 1/2 という設計を実現できます^[2]。

ガラス壁面の検出

図 1 に、モダンな建築物で採用されているガラス壁面とガラス製パーテーション、および床の掃除機吸引やモップ掛けを行うサービス・ロボットを示します。たとえば、壁面との衝突を防ぐために、これらを検出する必要があります。

これらの素材は、カメラや IR ベースのセンサを使用する場合、検出が困難であることが実証されています。

一方、ミリ波センサはガラス壁面の存在や、その背後にある物質を検出することができます。



図 1: モダンな建築物は、ガラス表面仕上げを幅広く採用している。

このようなガラス検出機能を実証するために、テキサス・インスツルメンツ (TI) の IWR1443BOOST ミリ波センサ評価モジュール (EVM) と、80cm 離れた場所にあるガラス製パネルを組み合わせてシンプルな実験を行いました。

次に、図 2 に示すように、ガラスの向こう側に、合計 140cm 離れた場所に不透明な壁パネルを設置しました。

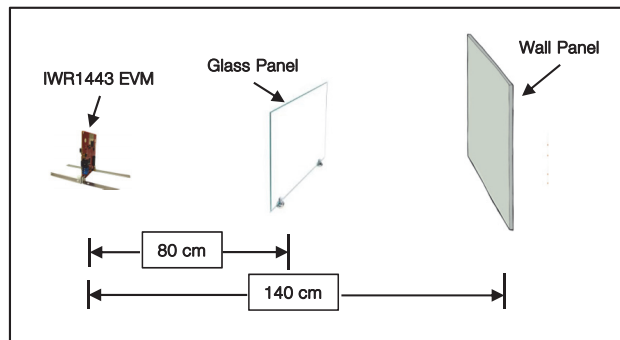


図 2: ガラス壁面を検出するテストの設定。

EVM に付属している mmWave Demo Visualizer の一部であるデモ・ソフトウェアと視覚化ツールを使用したところ、図 3 に示す結果が得られました。これは明確に、ミリ波センサがガラス壁面の表面と、ガラスの向こう側にある不透明な壁パネルを検出したことを示しています。

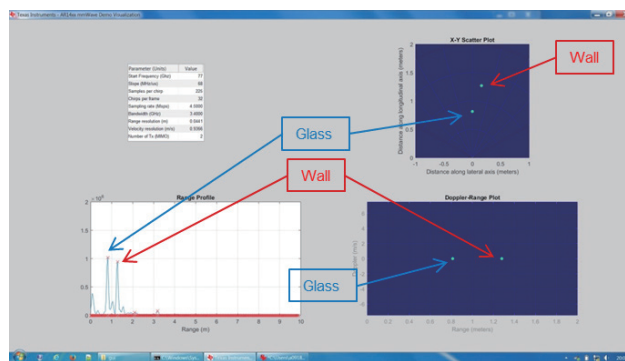


図 3: ガラスと不透明な壁パネルを検出したことを示す結果。

ミリ波センサを使用した対地速度の測定

ロボット・プラットフォームで自律的な移動を実現するには、高精度のオドメーター (路程測定) 情報が不可欠です。

ロボット・プラットフォームに取り付けられている車輪やベルトの回転を単純に測定し、そこからこの情報を求めることは可能です。

ただし、緩い砂利道、未舗装、濡れた路面 (グラベル、ダート、ウェット) のような路面で車輪が部分的に空転した場合など、この低コストのアプローチは簡単に破綻します。

より高度なシステムは、IMU (慣性計測装置) の測定値を加算し、さらに GPS を使用して IMU を定期的に補正する方法で、非常に高精度のオドメーター値を保証することができます。追加のオドメーター情報を提供するためにミリ波センサを使用して、ロボットが平らではない路面を移動する場合や、多数のピッチやヨーイング (縦揺れと横揺れ) がシャーシで発生する場合に、センサから地表に向かってチャープ信号を送出し、反射された信号のドップラー偏移を測定することができます。

図4に、対地速度測定用のミリ波レーダ・センサをロボット・プラットフォームに取り付ける際に利用可能な構成の例を示します。

方向については、レーダを図のようにプラットフォームの前方に取り付けるか、農業用車両の標準的な方法となっている後方に取り付けることもでき、これらはトレードオフの一例になります。

レーダを前方に照射する場合、同じミリ波センサを使用して、路面の縁をセンサすると同時に、倉庫内の輸送用ドックから逸脱してしまうなど、ロボット・プラットフォームの回復不可能な損失を避けることができます。

レーダを後方に照射する場合、ピッチやヨーイングが測定に及ぼす影響を最小化するために、プラットフォームの重心より下部にセンサを取り付けることができます。農業アプリケーションでは、このような影響が大きな懸案になります。

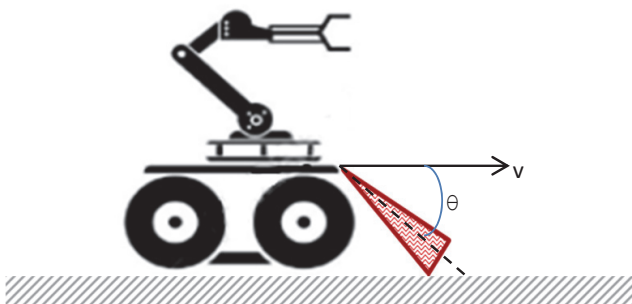


図4: ロボット・プラットフォームに取り付ける対地速度測定用レーダの構成例。

式1は、一様で理想的な条件下における速度を計算します。

$$f_d = (2V/\lambda) * \cos\theta$$

ここで、Vは車両の速度、λは送信した信号の波長、θはアンテナの俯角(見下ろす角度)、 f_d はヘルツ単位のドップラー周波数です。

式1を展開すると、速度計算誤差を補償できます。これは、平らではない路面が原因で、センサのピッチ、ヨーイング、ロール(回転)を引き起こし、回転方向の速度成分を生じさせることに伴う誤差です。

これらの計算はこの資料の範囲を越えますが、一般的な情報は参考資料^[3]に掲載されています。

ロボット・アーム周辺での安全保護

ロボットと人間の相互動作が進むにつれて、サービス用途や、数量の少ないフレキシブルな一括処理自動化タスクなどで、図5に示すように、ロボットが双方向動作に携わる担当者を傷付ける事態を避けることが不可欠になります。

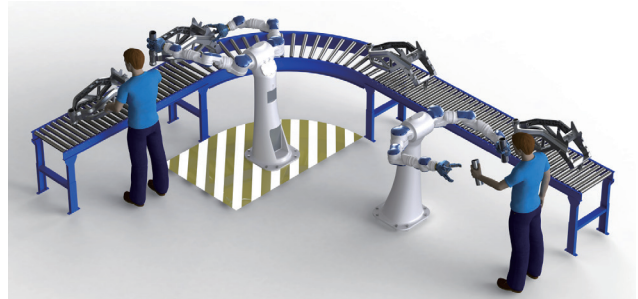


図4: 将来はロボットと人間の相互動作が進む見通し。

従来は、図6に示すように、ロボットの動作範囲の周辺にセーフティ・ライト・カーテンまたは立ち入り禁止ゾーンを設けて、物理的な分離を保証するのが一般的な方法でした。

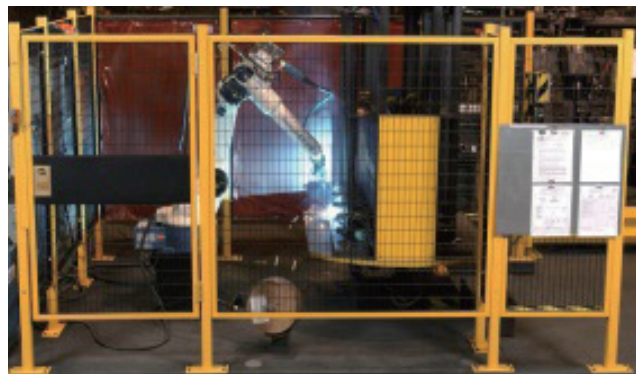


図6: 物理的な安全ケージ内で動作するロボット・アーム。

センサを活用すると、仮想的なセーフティ・カーテンやセーフティ・バブルを作り出し、ロボットの動作が意図しない形で人間と相互動作することを避けることができます。さらに、密度が高まり、動作のプログラム能力が改善されるので、ロボット相互間の衝突も回避できます。

ビジョン・ベースの安全システムは制御用の照明を必要としますが、この場合は消費電力が増加し、熱が生成されるほか保守も必要になります。

ほこりの多い製造環境、たとえば、織物やカーペットの製造工場では、レンズを頻繁に掃除するなど注意を払う必要があります。

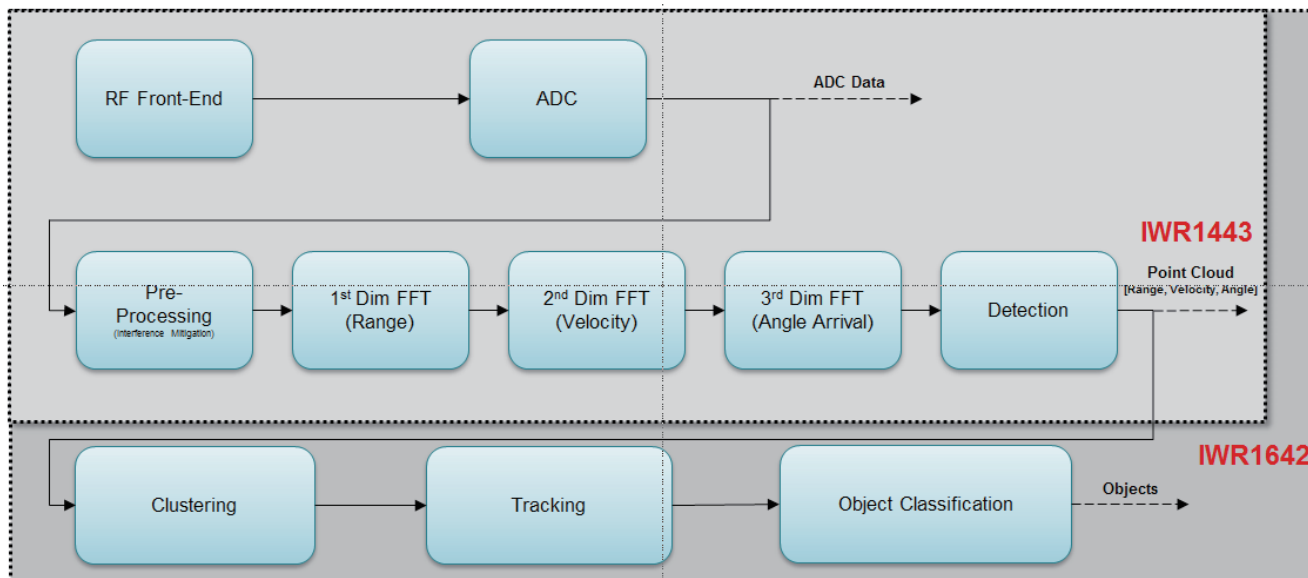


図 7: TI の IWR ミリ波センサの処理チェーン。

ミリ波センサは堅牢で、工場の床にある照明、湿度、煙、ほこりにかかわらず物体を検出するので、ビジョン・システムの置き換えに最適で、このような検出機能を非常に短い処理待ち時間で実施できます。通常、2ms 以下です。

視野角が広く、長距離の検出が可能なので、これらのセンサを動作領域の情報に取り付ける方法で設置を簡素化できます。

1 個のミリ波センサのみで複数の物体や人間を検出できるので、センサの所要数とコストを低減できます。

ミリ波センサが生成する センス・ポイント・クラウド情報

ミリ波レーダ・センサは、無線周波数 (RF) フロント・エンドのアナログ・データを A/D コンバータに渡してデジタル形式に変換します。

デジタル変換後のこのデータは、データ・ストリームを処理チェーンに渡すために高速な外部データ・バスを必要とします。チェーンで一連の算術演算が実施され、センサの視野角内で検出された複数のポイントの距離、速度、角度情報が生成されます。

従来、これらのシステムは大規模で高価だったので、TI はこれらすべての機能を単一のモノリシック CMOS シリコン製品に統合する方法を検討してきました。その結果、サイズ、コスト、消費電力の低減に成功しました。

付加的なデジタル処理リソースは、データの後処理に対応し、図 7 に示すように、クラスタ化、追跡、分類のようなタスクを実施できるようになりました。

1 人の人物が 1 個のミリ波センサの前を歩くと、複数の反射ポイントが生成されます。

検出されたこれらの各ポイントは、(次のページの図 8 に示すように) 一般的なロボット・オペレーティング・システム視覚化 (RVIZ) ツールで、センサに対する相対的な 3D フィールドにマップすることができます。

このマッピングは 1/4 秒の期間にわたってすべてのポイントを集めます。

収集したポイント情報の密度は、視覚的に認識できる足や手の動きをほぼ忠実に表しており、移動している人物であるという物体の分類が可能になります。

3D フィールドでオープン・スペース (空白領域) が明確に表示されている事実は、移動するロボットにとっても非常に重要であり、ロボットが自律的に動作できるようになります。

ミリ波センサを使用した マッピングとナビゲーション

IWR1443BOOST EVM が検出した物体に関するポイント情報を活用すると、ミリ波レーダを唯一のセンサとして使用し、室内にある複数の障害物を高精度でマップするほか、空き空間を識別して自律的な動作に役立てることができます。

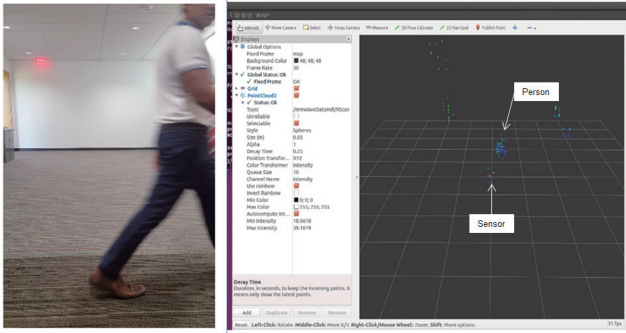


図 5: IWR1443BOOST EVM を使用してキャプチャした 1 人の人物のポイント・クラウドを RVIZ 内で提示。

Robot OS (ROS) や Arduino のような複数のロボット・オープンソース・コミュニティが存在しています。



図 9: IWR1443 BOOST Turtlebot 2 に取り付けられた EVM。

簡単な実証例として、図 9 に示すとおり、単一のミリ波センサ・レーダをマッピングとナビゲーションのアプリケーションで使用するために、Robot OS を選択し、IWR1443BOOST EVM の取り付け位置とし ROS コミュニティの Turtlebot 2 開発プラットフォームを選定しました。

EVM 用の基本的なドライバ (ti_mmwave_ropkg) を実装するために、ポイント・クラウド情報をナビゲーション・スタックに統合しましたが、その際に、図 10 に示すように OctoMap と move_base の各ライブラリを使用しました。

オフィス環境内部に複数の障害物を配置し、その領域を通過するように Turtlebot 2 を操縦し、OctoMap ライブラリを使用して 3D 専用物グリッド・マップを構築しました。

次のページの図 11 に、RVIZ を使用して表示した専用物グリッドのスクリーンショットを示します。

OctoMap を move_base と組み合わせてマップを生成した後、そのマップを使用して、次のページの図 12 のスクリーンキャプチャに緑の矢印で示す、最終的な目的地と姿勢制御位置を入力しました。

Turtlebot 2 はナビゲーションを正しく、また効率的に実施し、選択したスポットへ移動した後、回転して適切な姿勢を取り、その途中経路にある複数の障害物を静的および動的な方法で回避しました。

この実験を通じて、前方を向けた単一のミリ波センサを使用してロボットの基本的な自律型ナビゲーションを迅速に実行する手法の有効性を ROS 環境で実証できました。

まとめ

ミリ波センサは、従来は高価でサイズも大きく、複数のディスプレイ部品が必要でした。

ただし、現在は、RF、処理、メモリの各リソースを単一のモノリシック CMOS ダイに統合した TI の手法により、ミリ波センサが、ロボット分野で使用されている既存のセンシング・テクノロジーを補完または置き換える見通しであると言えます。

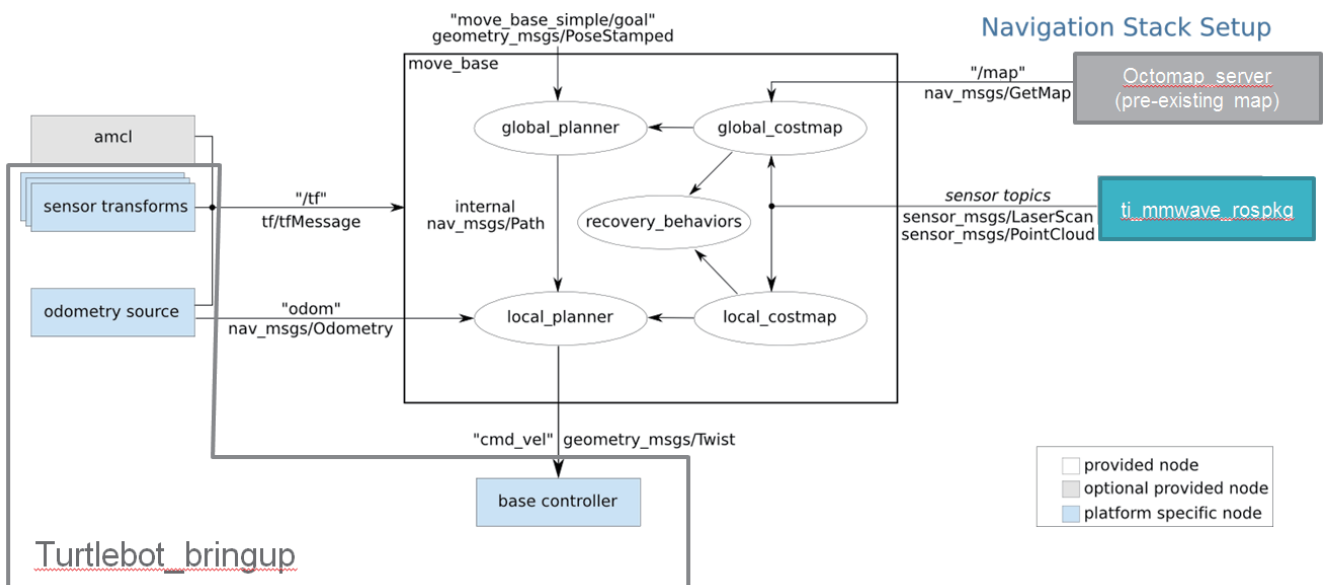


図 10: IWR1443BOOST- を取り付けられた Turtlebot 2 と組み合わせて使用した、ROS ライブラリのナビゲーション・スタック。

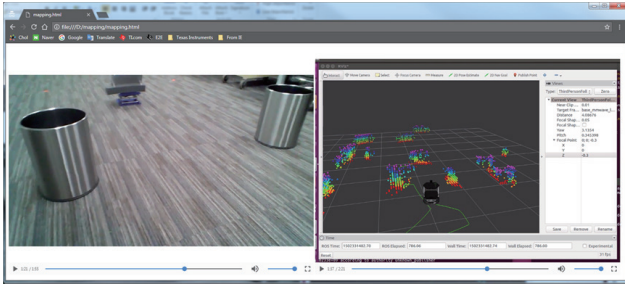


図 11: ROS 内で OctoMap ライブラリを使用して専有物マップを生成。

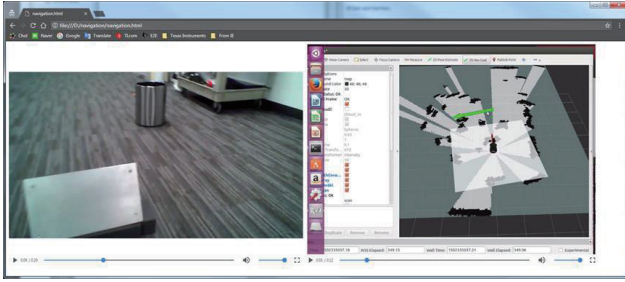


図 12: ROS の move_base ライブラリと組み合わせて Turtlebot 2 の自律型ナビゲーションを行う目的で、IWR1443BOOST EVM の専有物マップを使用。

要約すると、他のテクノロジーに対するミリ波センサの優位性は次のようになります。

ミリ波センサは、直射日光、影、水からの光の反射のような環境条件の影響をあまり受けません。

ミリ波はガラス壁面、ガラス製パーティション、ガラス仕上げの表面を検出できます。光（ビジョン）ベースのセンシング・ソリューションは、これらの検出に失敗する可能性があります。

ミリ波は物体に対するドップラー速度情報を提供します。このような情報は、濡れた路面などでホイールの一部空転が発生する状況で、ロボットのオドメーター情報を補正するのに役立ちます。

ミリ波ベースのセンサの機械的な複雑度は低いので、製造時の調整や誤差キャリブレーション・プロセスを減少させることができます。開口部やレンズがないので、筐体プラスチックの内部に直接取り付けることが可能です。キャリブレーション機能を内蔵しているため、製造ラインの複雑度を低減できます。実現可能な視野角が広いので、センサ・メカニズムを機械的に回転させる必要がなくなります。

TI の高集積シングル・モノリシック CMOS ミリ波センサにより、すべての処理をセンサ内で実施できます。この結果、BOM（部品表）コストの低減、センサの小型化、また従来の中央コントローラ・プロセッサとビジョン・ベース・システムの間で必要とされていた毎秒数百万回の命令の削減を実現できます。

ミリ波センサ・テクノロジーは、ロボットのインテリジェントな動作を強化すると同時に、実際の環境で堅牢性を高めることができます。

このテクノロジーを適用すると、ロボット・システムの迅速な対応能力をさらに加速することができます。

リファレンス

1. Tractica. [“Robotics Market Forecasts.”](#) 2Q 17.
2. Barrett, D., D. Wang, A. Ahmad and V. Mahimkar. [“Using mmWave sensors to enhance drone safety and productivity.”](#)
Texas Instruments white paper SPYY001, 2017.
3. Fleming, W.J., and A.K. Hundiwal. [“Radar Ground Speed Sensors.”](#) 35th IEEE Vehicular Technology Conference, 1985, pp. 262-272.

S-0107

ご注意：

本資料に記載された製品・サービスにつきましては予告なしにご提供の中止または仕様の変更をする場合がありますので、本資料に記載された情報が最新のものであることをご確認の上ご注文下さいようお願い致します。

TIは製品の使用用途に関する援助、お客様の製品もしくはその設計、ソフトウェアの性能、または特許侵害に対して責任を負うものではありません。また、他社の製品・サービスに関する情報を記載していても、TIがその他社製品を承認あるいは保証することにはなりません。



TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。