

ミリ波センサを活用した ドローンの安全性と 生産性の実現



Dennis Barrett
Marketing manager

Dan Wang
System engineer

Adeel Ahmad
System engineer

Vaibhav Mahimkar
Applications engineer

テキサス・インスツルメンツ

概要

飛行型ドローンは、荷物輸送の試行から、娯楽、スポーツ・イベントまで多様な用途で飛行しており、各種一般向けに販売されています。2022年までに、無人航空機(UAV)市場は210億ドルの規模に達すると予測されており^[1]、ドローンを活用した世界の業務サービスの価値は1,270億ドルに上ると予測されています^[2]。急速にドローンの影響を受けることが予期される業界として、インフラ、農業、輸送、セキュリティ、エンターテインメントとメディア、保険、電気通信、鉱業を挙げることができます。

特定の業界向けにドローンの設計とカスタム化を行うと、生産性の最適化、安全性の向上、現行の手法で環境に及ぼしている影響の緩和を推進することができますが、一方で、ドローンの設計者は現実的な導入を進めるにあたって、以下のような多数の設計上の課題に直面します。

- **あらゆる条件下における動作:** 飛行しているドローンの着陸も容易とは限りません。天候、照明条件、煙や霧による視界の悪化、樹木や他の物体による物理的な障壁は、導入するドローン・システムの実際的な生産性に大きな影響を及ぼす可能性があり、さまざまな環境条件下で実際に動作することができるドローンを設計する必要があります。
- **軽量設計:** ドローン・プラットフォームの重量を減らす方法で、所定のバッテリーに対応する飛行時間を長くすることができます。ドローン・システムが軽いほど、導入は容易になり、ドローン・プラットフォームの重量を軽減すると、搭載可能なペイロードを増やすことにもつながります。この事実は、用途ごとにオンボード搭載する必要のあるツールにも該当します。これらの検討事項すべては、ドローン・プラットフォームの生産性を大幅に高めます。
- **高速:** ドローンの飛行速度や性能が高まるほど、生産性も向上しますが、設計者は速度と安全性の検討事項の間でバランスを維持する必要があります。ドローンで実現できる最大水平速度は時速70km以上に達します。2台のドローンが互いに向かって正面から一直線に飛行するときの接近速度は毎秒40mに達し、検知と回避の機能を実現する上で大きな課題をもたらします。

- **インテリジェントな動作:** ドローンの動作にとって最も危険な時は、地表付近での飛行、離陸または着陸です。地表との距離を測定する際に、誤差の余裕が減るからです。このような状況でオペレータが操作を誤った場合、ドローンの破損または全損が発生する可能性があり、生産性に大きな影響を及ぼすことに加え、安全性に関する多くの懸念を引き起こします。重要な要因は、ドローンが地表に接近する速度が速くなるほど、cm単位の高精度で距離を検出する能力が不可欠になることです。

必須となるもう1つの機能は、ドローンが安全な着陸のために地表の種類を検出できる能力、また地表が濡れているか乾燥しているか識別する能力です。

- **物体の検出と回避:** ドローン・プラットフォームは、物理的な障害物が存在する環境で動作します。障害物を検出し、回避することができる能力は、ドローンの破損や全損が発生する可能性、および周囲に損害をもたらす可能性を低減します。高速な計測は、リアルタイム計算と素早く組み合わせられる必要があります。

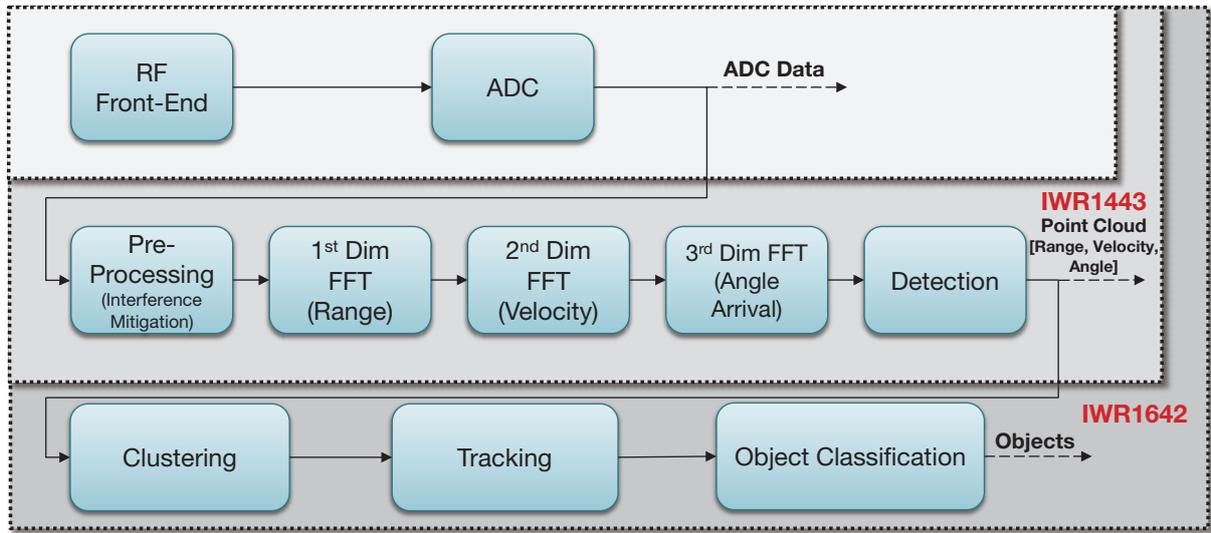


図 1：ミリ波の信号処理

ミリ波シリコン・センサの応用

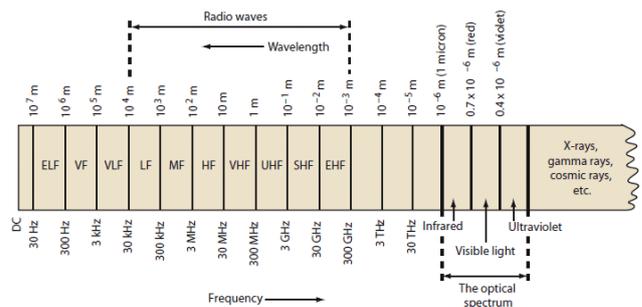
TIのミリ波センサは、RF処理、キャリブレーション、高速ADC、マイコン(MCU)、デジタル信号処理(DSP)、メモリの各機能を単一のCMOSモノリシック・チップに統合した製品で、センサとドローンの周囲にある物体の間の距離、速度、角度をより高精度に報告します。統合を高いレベルで実施した結果、スケーラビリティの高いデバイス・ファミリが登場し、図1に示すさまざまな処理出力に対応できます。これらの出力をさまざまなシステム・アーキテクチャで使用して、ドローン制御システムに対してリアルタイムなインテリジェンス(データを処理した結果得られる知見)を出力し、周囲の環境や障害物となる可能性のある物体を知らせることができます。

このリアルタイムなインテリジェンスを活用すると、設計者は実際の導入環境で高い生産性で動作するドローン・システムを構築し、前述のような設計上の課題に対処することができます。複数のセンサとセンシングの多様性の導入により、安全性の冗長性が高まり、ミリ波センシングは上記の課題に対処するための独自の特性を発揮することができます。

あらゆる条件下における動作

レーダ技術は目新しいものではなく、英国の物理学者 Sir Robert Watson-Watt が最初の実用的なシステムを製作したのは1935年のことです^[3]。

現在の航空分野で使用されているマイクロ波レーダに類似した方式で、ミリ波デバイスは30GHz～300GHzのスペクトルを使用し、あらゆる気象条件下で動作します。個々の周波数スペクトルは図2に示すとおり、ミリ波センサは光通信とマイクロ波波形の間に相当するスペクトルで動作します。



Electronic Design より引用 <http://www.electronicdesign.com>

図 2：周波数スペクトル

ミリ波センサをこのスペクトル内で動作させると以下のような特性を示します。

- 物質を貫通し、プラスチック、セメント、布の内部を透視することが可能
- みぞれ、雨、雪、他の危険な状況でも見通しを確保可能
- 1度の精度で非常に指向性の高いコンパクトなビームの操作が可能
- 短い波長を使用し、1mm以下の範囲精度を実現
- 焦点合わせと操作に標準的な光学手法を採用
- 広い絶対帯域幅で、2つの物体を区別する能力を実現

軽量設計

CMOSシリコン・テクノロジーを使用して、必要とされる機能のほとんどを単一のモノリシック・ダイに統合しており、TIのミリ波デバイス、パワー・マネージメント、起動用のProm IC、およびPCB基板が該当センサ全体を実装するには、PCBボード・アンテナが必須です。図3に、既存のモジュールのサイズを示します。これは、D3 Engineering社の製品であり、3本の送信用アンテナと4本の受信用アンテナを採用した構成でTIのミリ波センサを使用しています。表1は、ミリ波モジュールの寸法と重量を最新のLIDAR光学距離計と比較したもので、サイズがほぼ3分の1に縮小し、重量がおおよそ半分で済むことを示しています。

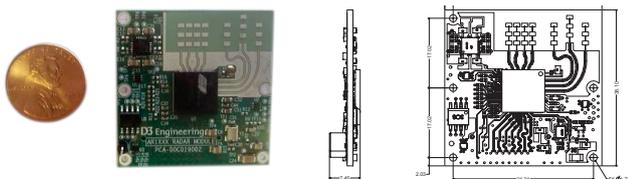


図3：代表的なミリ波モジュールの設計

	mmWave Module	LIDAR rangefinder Module	Reduction %
Module size	38 × 38 × 7.5 mm	20 × 48 × 40 mm	72%
Module weight	7.5 g	16 g ^{Note 1}	53%

注1 - 光学系とハウジングを含む

表1：D3社のミリ波センサ・モジュールとLIDARモジュールのサイズおよび重量の比較

ソリューションがコンパクトであることから、プラスチック筐体内にセンサを簡単に配置することができ、堅牢であると同時に重量を最小限にとどめた設計を実現できます。この特性は、光学ベースまたは赤外線 (IR) ベースのソリューションとの比較ができ、レンズのハウジング、治具による加工、製造試験の過程におけるキャリブレーションを必要とし、アセンブリ・コストの削減を実現できます。

高速

ドローンは非常に高速に飛行することができ、最大仕様は時速72kmに達します。したがって、どのセンシング・テクノロジーを採用する場合も、このような領域で速度を測定できる能力が必須になります。Vmax、つまり測定可能な最大速度 (センサと測定対象物体の両方が移動している場合は最大相対速度) は、式1に示すように、ミリ波送信信号の合計チャープ期間に関連します。

$$V_{max} = \lambda / (4T_c) \quad (1)$$

ここで、Tcはチャープ持続時間/トータル期間、λは1サイクル内の移動距離、Vmaxはメートル/秒です。IWR1443デバイスに関するTIのデータシートから、

λ = 3.9mmです。これは開始周波数が76.5GHzの場合に対応します。

Vmaxが時速72kmの場合、Tcの値は48.75μsに等しくなります。

反比例の関係に基づき、TcがVmaxは検出可能です。Tcの値を計算する際にVmaxの値全体を対象にすると、図4に示す曲線が示めされます。

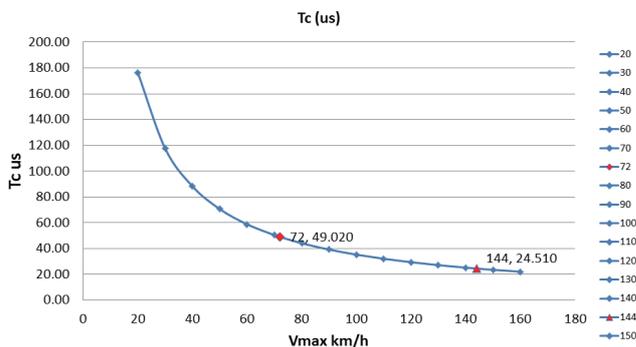


図4：測定可能な最大速度とチャープ持続時間/合計期間

インテリジェントな動作

実的なアプリケーションでドローンの生産性を最大限に高めるために、ドローンに搭載されているセンサから提供するインテリジェンス(データを処理した結果得られる知見)を使用して、動作を支援することが重要です。すでに説明したように、ドローンで最も危険な時は、着陸時のように地表付近を飛行しているときです。ミリ波テクノロジーは、着陸時にナビゲーション情報を提供し、着陸しようとする地表の安定性を評価することができます。これらのセンサは、他のセンサと同様、風による影響や、地表近くを飛行しているときにドローンのプロペラが巻き起こすほこりの影響を受けにくいという特長があります。

IWR1443 mmWave 評価モジュール (EVM) を使用すると、速度がホバーから毎秒25cm強の範囲内にあり、高度が地表レベルから 40m 上空までの範囲にあるとき、2cmの精度を実現できます。

図5に、ドローン着陸のデモを実施したときのスクリーン・キャプチャを示します。ここでは、ドローンが19.73cmの高度にあり、地表に対する相対速度が毎秒22.55cmであることがわかります。



図5：ドローン着陸デモのスクリーン・キャプチャ

また、ミリ波センサは精度が高いので、ドローンが最終的に着地する直前に静止状態にあるドローンのプロペラが巻き起こした地表の動きに基づいて、着陸しようとする面の種類を決定できる潜在能力があります。IWR1443 mmWave EVM を使用して TI で行った実験(ドローンが飛行していない静止条件下)では、地表と水面が区別できることが明らかになりました。その基準は光の反射率の違いと、図6に示すように、材質の表面における微細な振動の測定によります。センサが水を検出した場合、ドローンは着陸を回避し、その結果、荷物やドローンの全損を回避することができます。

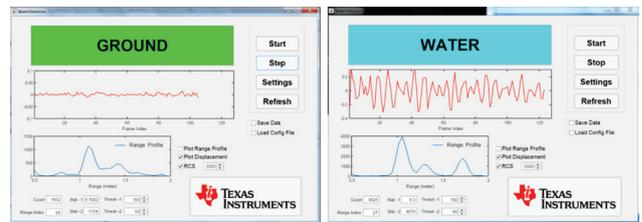


図6：ミリ波を使用した地表または水面の検出

物体の検出と回避

インテリジェントな判断能力と回避動作の中核にあるのは、飛行経路直線で遭遇する可能性の高い障害物を検出するドローンの能力です。仮に検出に失敗した場合、衝突し、プラットフォームの破損または全損を招いて、生産性に悪影響を及ぼすことになります。照明、煙、ほこり、霧などに関係なく、各種条件下で物体を検出するミリ波センサの能力に加えて、他のセンサ・テクノロジーを使用する場合は検出が困難な物体も検出するという独自の位置付けがなされています。

一つの例としては、電力線、電話線、空中アンテナ、針金でできたフェンスなどのワイヤがドローンの飛行経路に存在するときに、それらのワイヤを検出する状況です。TIは無響室を使用して一連の実験を行い、さまざまな種類のワイヤの検出を評価しました。図7に、ラボのセットアップを示します。

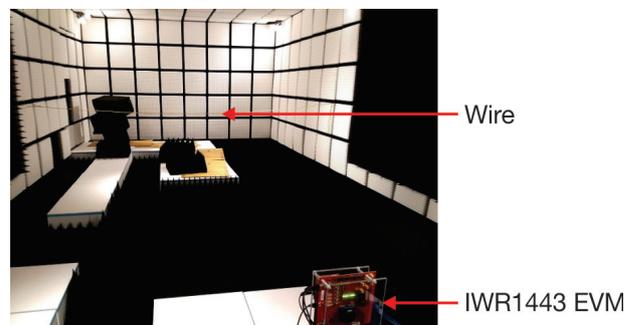


図7：ワイヤ線のテストに使用した無響室のテスト用セットアップ

テストに使用したワイヤの種類は、電力用の延長コード (extend)、Category 5のイーサネット・ケーブル (ethernet)、非金属製 (ゴム製) のケーブル線 (rubber)、AWG-30規格の2本の銅線を使用したツイストペア (twist)、および1本の同ゲージの銅線 (thin) であり、図8に示すとおりです。

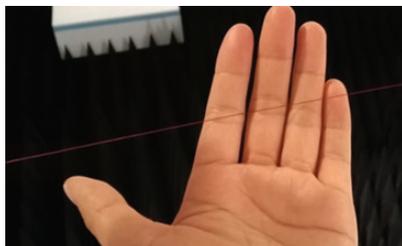


図8：AWG-30の銅製ワイヤ

IWR1443 mmWave EVMのアンテナを使用して、1mの距離にある垂直位置と水平位置 (フリップが付いた項目) に対応する測定値を収集しました。表2に、テスト結果を示します。垂直の向きに比べて、水平の向きはSNRの値が大きくなっています。SNRの値が大きいのは、テストチャンバー内でこの向きを使用した場合に乱れが小さかったことが原因であり、特にツイストではない単一の細いより線 (thin) を使用した場合に顕著でした。

また、IWR1443 EVMに実装されている4個の受信アンテナを使用してRXデジタル・ビームフォーミング (BF) を適用したときは、6dBのゲインを得ることができました。

Parameter	Value
Start frequency	77 GHz
Frequency slope	33 MHz/μs
Sampling rate	10 MHz
ADC samples_3.3G	1000

Test	CFAR SNR	
	no BF	BF
ethernet_1m	21	24
ethernet_1m_flip	21	28
extend_1m	12	14
extend_1m_flip	21	33
rubber_1m	21	31
rubber_1m_flip	8	18
thin_1m	-4	-6
thin_1m_flip	10	18
twist_1m	17	24
twist_1m_flip	14	23

表2：IWR1443 EVMを使用したSNR分析

ホーン・アンテナは、クラッターを大幅に低減するために、アンテナのビームをかなり絞り込みます。このテストを実施する際に、ワイヤを4.5mの長さで敷設し、ワイヤの種類ごとにCFAR (Constant False Alarm Rate、一定の誤警報レート) のSNR (信号対ノイズ比) を測定しました。式2で、ワイヤの最大検出可能範囲を次のように計算します。

$$\text{SNR} \sim 1/R^3 \quad (2)$$

図9は、CFARの検出スレッシュホールドを15dBに設定した場合に、ワイヤの種類ごとに予期される最大検出範囲を示しています。

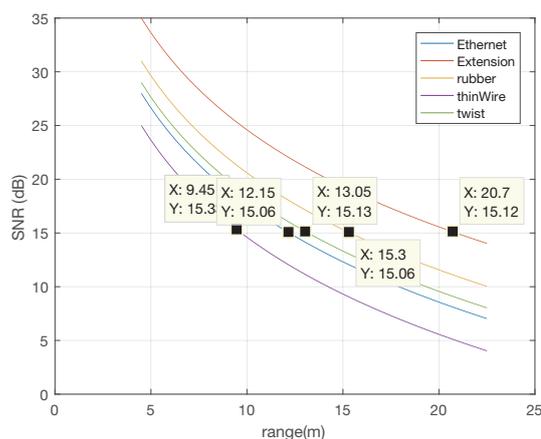


図9：ワイヤの種類ごとに外挿法で推定した検出範囲

この分析は、テストしたワイヤの種類すべてをTIのミリ波センサが検出できることを示しました。非常に細く、最大の課題であったAWG-30の銅線でできた1本のより線を使用する場合も、外挿法による推定では9mの距離で検出でき、今回のテストで最も太い電力線の延長コードを使用する場合は21mの距離で検出できると推定されました。

IWR1443 mmWave EVMは、MIMO (複数入力、複数出力) に対応しており、電力線が架空に敷設されている実際の屋外データを採取しました。次のページにある図10が示すように、直径の細い電力線 (赤い矢印から4番目のワイヤ) は写真の中でかろうじて見えている程度ですが、EVMは確実にこれらの電力線を25mないし最大38mの距離で検出することができます。この実際のデータは、ラボでサンプルとして選択したワイヤ線の種類がかなり意欲的な性質であったこと、また外挿法による結果が妥当であったことを明らかにしています。

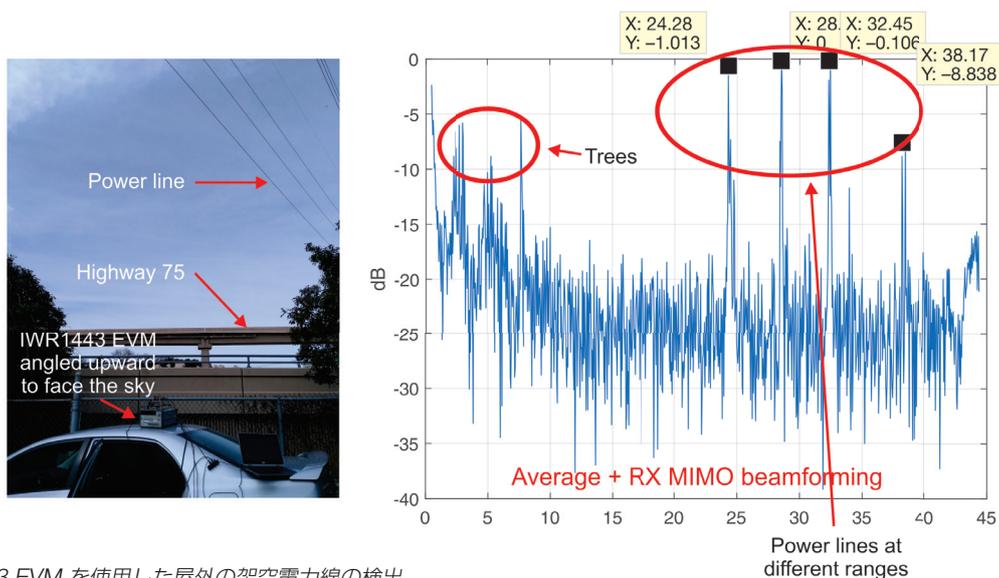


図 10 : IWR1443 EVM を使用した屋外の架空電力線の検出

副次的な観察結果として、テスト画像に写っている樹木の枝も、センサの視野に入っていることが明らかになりました。TI のミリ波センサは、枝が動いているか、影の多い状況であっても、葉の茂った樹木を検出することができます。また、電力を消費する過度の計算要件が発生することはありません。

ミリ波センサは、非常に細い1本のより線から、標準的な架空電力線まで各種のワイヤ線を確実に検出ことができ、後者は40m 近く離れた場所で検出できます。

分析にこの例を選択したのは、他のセンシング・テクノロジーを使用する場合、センシングが困難で、計算が複雑になるという特性があるからです。また、この例は産業用ドローンの実地的な導入を示すものであり、期待される生産性と安全性レベルを達成するために、物体を検出し、その周囲を迂回する必要があることを明らかにしています。

まとめ

モノリシックのシリコン・チップに統合されているTIのミリ波センサは、経済面の生産性を高めるドローン・プラットフォームを開発することを可能にします。これらのセンサはあらゆる条件下で動作する優れた性能を発揮し、高速飛行に対応でき、着陸時と離陸時にインテリジェンスを提供するほか、

電力線のような物体を検出することができます。小型軽量で、堅牢、なおかつドローンのプラスチック筐体に容易に収容できるセンサで、このような性能を実現した結果、TI のミリ波センサ・デバイスは、ドローン・メーカーにとってセンシング・ソリューションの第一線にある有力な候補になっています。

テキサス・インスツルメンツは、産業用ミリ波センサ製品の開発に携わるエンジニアに、以下のような包括的な開発環境をすでに公開しています。

- **ハードウェア EVM : IWR1443 と IWR1642** mmWave デバイス向け。
- **mmWave ソフトウェア開発キット (SDK)** : リアルタイム・オペレーティング・システム (RTOS)、ドライバ、信号処理ライブラリ、ミリ波のアプリケーション・プログラミング・インターフェイス (API)、およびセキュリティ機能 (別途入手可能) で構成。
- **mmWave Studio オフライン・ツール**: アルゴリズムの開発と分析を目的とし、データ・キャプチャ、ビジュアライザ、システムを見積もり。

mmWave センサの製品ファミリー、ツール、およびソフトウェアの詳細については、www.tij.co.jp/mmwave をご覧ください。

リファレンス

1. Markets and Markets. [“Drones Market by Type \(Fixed Wing, VTOL, STUAS, MALE, HALE, UCAS \), Payload \(Up to 25 Kg, Up to 150 Kg, Up to 600 Kg, Above 600 Kg\), Application \(Precision Agriculture, Retail, Media & Entertainment\), Component, and Geography – Global Forecast to 2022.”](#) October 2016.
2. PwC. [“Clarity from above. PwC global report on the commercial applications of drone technology.”](#) May 2016.
3. [Invention of the Radar – Obstetric ultrasound.](#)
4. RobotShop.com. [LIDAR-Lite 3 Laser Rangefinder.](#)



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。