

TIのミリ波センサ採用による、 微細動作検出と人数計測向けの インテリジェント自律機能の導入



Keegan Garcia
Marketing Manager,
Industrial Radar Sensors
Texas Instruments

スマート・ビル、工場、都市などのアーキテクトや都市計画担当者は、リソース節減や、安全性に関する懸念増大の緩和のような課題に取り組み、よりシームレスな人と機械の対話型操作を実現するために、インテリジェント・センサの必要性が高まっていると考えています。

特に、人の位置を検出し、動きを検出することができると、よりスマートな今後の世界に適した自律型の動作を実現できます。図1に示すように、このようなシステムとして、屋内や屋外のセキュリティと監視、自動ドア、ファクトリの機器向け安全性スキャナ、照明やエアコン(HVAC)やエレベータを制御するための自動機器などを挙げるすることができます。

ミリ波(mmWave)レーダは、このようなシステムで人の検出、位置判定、追跡を行う方法を革新する目的で製作したセンシング・ソリューションです。TIのミリ波センサの特長は、さまざまな環境で物体の距離、速度、角度を検出できるほか、オンチップ処理で高水準のアルゴリズムを実行できることです。これらの特長により、ビル、工場、都市を自動化する際に占有センサと動作センサに対応し、位置判定と移動検出で高制御を実現すると同時にプライバシーを維持する機能をいづれもシングルチップで実現して、エッジ側での処理に貢献します。

現在のテクノロジー

人の占有検出と追跡を行う現在の各種センサは、パッシブ赤外線(PIR)、光学カメラ、LIDARや3Dタイム・オブ・フライト(ToF)のようなアクティブ赤外線、10GHz～24GHzのマイクロ波のようなテクノロジーを使用しています。表1で、これらのテクノロジーを比較し、それぞれの長所と短所を示します。ただし、セキュリティ、安全性、効率に関する期待が上昇している現状で、次世代のセンサは、高精度かつ高信頼性のセンシングを実現すると同時に、センサの一般的な課題も克服する必要があります。人の検出と占有状況の測定を目的として設計されている各種センサの課題について考えてみましょう。



図1: TIのミリ波センサを採用すると、屋内や屋外のセキュリティと監視、自動ドア、ファクトリ・オートメーション、照明やエアコンの自動的な制御など、ビルと工場のさまざまなアプリケーションでインテリジェント・センシングを実現できます。



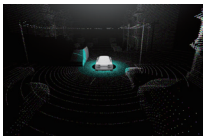

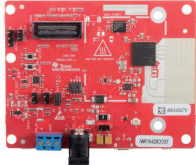
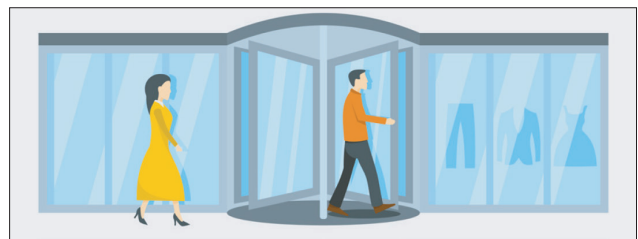
	Passive infrared (PIR)	Optical cameras	Active infrared (LIDAR, ToF)	Microwave (10 GHz or 24 GHz)	TI mmWave
					
Description	Measures changes in infrared light in order to detect motion	Analyzes imagery to determine people movement and behavior	Measures infrared light ToF	Discrete components assembled to create a radar for motion detection	TI single-chip radar sensor provides range, velocity and angle information about objects
Pros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simple, low-power consumption 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Algorithms applied for variety of applications ✓ Video for recording and monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High angular resolution provides a rich data set, similar to cameras 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High sensitivity to motion (breathing, typing) ✓ Extended range (+50 m) ✓ Insensitive to weather, changing environments 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High sensitivity to motion (breathing, typing) ✓ On-chip processing for single-chip tracking, classification ✓ Extended range (+50 m) ✓ Insensitive to weather, changing environments
Cons	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Low sensitivity to fine motion ✗ False detection outdoors from sunlight, temperature ✗ Limited range, no position or distance information 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ False detection from shadows, occlusion, day/night, environment ✗ Complex software and processing requirements ✗ No position/range information ✗ Privacy considerations 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Limited range in the presence of sunlight (5-10m) ✗ Complex software and processing requirements 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Hardware and software design and integration complexity ✗ No position information ✗ Large form factor 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Lower angular resolution than cameras or active infrared

表1:ビル・オートメーションにおける既存のテクノロジーと、それぞれの長所と短所



(a)



(b)



(c)

図2: 誤検出の例: 代表的な商用オフィス空間で採用しているPIRセンサは、誤検出をすることがある(a)。動作の方向によっては誤検出が発生し、必要のない状況で自動ドアを開いてリソースを無駄にする(b)。センサが動作のみに感応する場合、動物が誤検出を引き起こすことがある(c)。

誤検出

現在のセンサが直面する大きな課題の1つは、図2に示すような誤検出です。これは、センサのイベントが発生したときに、アラームやシステム・トリガなどを通じて、誤って反応してしまう、または誤って見落とししてしまうことを意味します。誤検出には2種類の形態があります。一つは、実際は動作が発生していないが反応する“過剰反応”（フォルス・ポジティブ）、二つめは、実際は動作が発生しているが反応しない“見落とし”（フォルス・ネガティブ）です。これらが発生する原因は、テクノロジーに起因するセンシングの具体的な失敗や過度の高感度です。

2つめの“見落とし”とは、重要であると判定すべきイベントが発生したにもかかわらず、センサが反応しない状況を指します。1つめの“過剰反応”とは、重要でない判定すべきイベントが発生したときに、センサが反応してしまう状況を指します。接続先の上位システムに応じて、センサの過剰反応は照明の点灯のように事実上無害なこともあれば、より重大な状況として、セキュリティ・ガードの検査を必要とする結果（人が有効なIDを提示した場合にのみ開くべき状況で、光などを誤検出して開いてしまう）を招くこともあります。

見落とし – 動作に対する感度

夜間のオフィスで、人がいるときは自動的に点灯するように設定されている照明を使用していて、人がいるのに自動的に消灯されてしまった経験はあるでしょうか。原因は、人の動きが不十分で、人が存在していることを登録すべきセンサが登録に失敗し、照明がオフになったことです。このような見落としの例は、PIRセンサを使用するとき一般的に見受けられます。動作に対する感度の不足が原因です。屋内にいる人はおおむね静止している傾向にあります。静止していないのは、コンピュータへの入力、座席の上での位置調整、呼吸などの微細な動作などです。高精度の占有センシングを実現するには、このようなごく微細な動作に対する感度を高めることが必須になります。

過剰反応 – 環境

過剰反応の一般的な原因の1つは、環境です。照明、降雨、温度、湿度、通気や風のような周囲の条件が原因で、センサが誤ってトリガされる可能性があります。屋外に設置したカ

メラやPIRセンサでこの種の過誤が生じる例として、直射日光や降雨がセンサの「視界」を妨げ、実際は動作が発生していないにもかかわらず、動作イベントを登録させてしまうことがあります。

過剰反応 – 動作の方向

過剰反応に関するもう1つの例は、人が動作している状況で、その方向を高精度で検出することができない、という能力不足に由来します。自動ドアについて考えてみましょう。コンビニエンス・ストアや小売店が道路に面している状況で、店舗に入る意思はなく、店舗の前の道路を通過しているだけで、自動ドアが開いてしまった経験があるでしょうか。この場合、エネルギーを浪費する結果になります。不要な状況でドアのモーターを動作させ、エアコンによって温度調整された空気を屋外に出してしまうからです。明日のセンシング・システムの効率向上を目指すには、単純に近接性に基づいて反応する代わりに、人がどの方向に行こうとしているのか推論できるようにすることが不可欠です。

過剰反応 – 高精度の位置検出

位置に基づく検出も、過剰反応を招くことがあります。セキュリティの境界内で監視と動作検出に使用する光学カメラ・システムについて考えてみましょう。過剰反応の例として、カメラがセキュリティ・ガードへのアラームを生成し、セキュリティ境界の内部だけではなく、外部の動作に反応する状況を挙げることができます。移動している物体が、懸案の領域の内部と外部のどちらにあるのか理解するうえで、移動している物体の位置を高精度で検出できる能力が不可欠です。

過剰反応 – 人以外の検出

大半のインテリジェント・システムにとって主な関心事は、物体ではなく人の検出と位置を識別することです。残念なことに、揺れ動く樹木、小刻みに走る動物、または通過する自動車などの移動する物体が、結果的に動作検出システムを惑わし、人が存在していると錯覚させることがあります。この問題を克服するために、センサは物体のサイズや移動の特性に基づいて物体のフィルタ処理や分類を行う能力を実現する必要があります。

プライバシー

各種自動型システムのコネクティビティとインテリジェンスが継続的に向上している状況で、公共または私有の空間にセンサを設置すると、公衆全般は、自らの個人的身元が認識されるという懸念を抱く可能性があります。システムにとって有意義なデータを提供するとともに、匿名性を維持するセンサを実現することは、重要な利点になります。

ソリューションの複雑さ

ソリューションの複雑さは、ビル・オートメーションへのセンシング・テクノロジーの導入を検討する際に大きな障壁になる可能性があります。ソリューションがハードウェアとソフトウェアの設計にとってシンプルであることを保証できる場合、そのテクノロジーを市場に導入し、センシング・システムが対処することが求められるあらゆる領域を網羅しようとするユーザーは、投下する必要のある投資を大幅に低減することができます。

処理と意思決定をエッジ側で実現すると、ビル・オートメーション・システムでハードウェアとソフトウェアの設計を簡素化することにもなります。センサのあるエッジ側で意思決定を下すと、ユーザーはデータ転送量、中央側でのデータ格納量、中央側で意思決定を下す集中システムや人員を最小化する方法で、システム設計の簡素化を実現できます。

環境による遮蔽

センサにとっての主な課題は、環境内に存在する各種物体が、関心のある物体との見通し視野を遮ることです。壁、植物、光線を通さないガラス、その他の物体は、光学テクノロジーをベースとするセンサの妨害要因となり、顕著な場合は

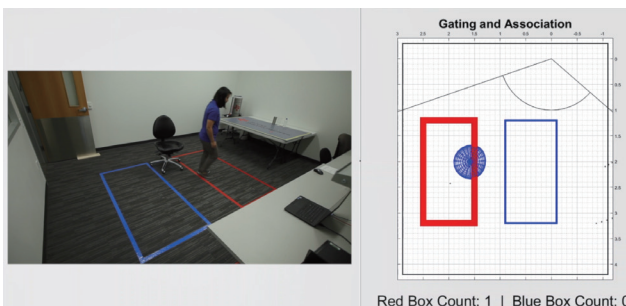


図3：ミリ波センサによる距離情報と角度情報は、高精度の位置情報を提供する。赤い「立ち入り禁止」ゾーンに人が立ち入った場合、赤いボックスが強調表示される。この情報を使用して、ビル・オートメーション・システムをトリガすることができる。

この種のセンサの設置、配置、使用に制限を課す結果になります。センサが、無線周波数(RF)や他の貫通性の高いテクノロジーを使用する場合、特定の物体を貫通してその先を見通す利点を実現することができ、これらのセンサを実装する新しい方法を切り開くことができます。

ミリ波テクノロジーの紹介

TIのミリ波テクノロジーとIWRファミリのセンシング・デバイスには、多数の重要な特長があり、誤検出の減少を含め、ビル・オートメーション・アプリケーションで複数の利点に確実につながります。

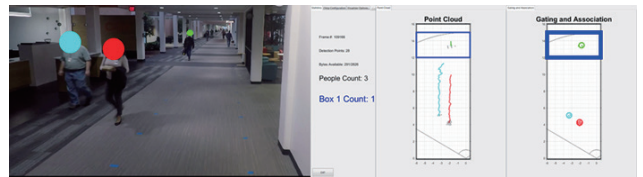


図4：TIのミリ波センサは、速度情報とオンボードでの追跡機能を活用して、移動の方向を判定する。青のドットと赤のドットの軌跡を追跡すると、移動の途中で人の方向を理解できる点に注意。この機能を活用して、人がどこへ向かおうとしているのか、また関心のある特定の領域へ向かっているかどうかを推論できる。

ミリ波は、距離、速度、角度という3つの固有データ・セットを提供することができる唯一のセンシング・テクノロジーです。ミリ波センサは、これらのデータを組み合わせる方法で、人の位置や、移動の方向を高精度で判定することができます。

図3に、これらのデータ・セットを使用して、人が特定の領域に立ち入ったときにシステムのアクティブ化をトリガする方法を示します。ミリ波センサは速度データを活用して、環境内に存在していても動いていない物体を無視することができます。体の揺れ動きや呼吸などのわずかな量であっても、人は常に動いているので、ミリ波は人を検出し、追跡対象として選択することができます。

図4に、速度データを使用して、人の移動の方向と速度を推論する方法を示します。TIのミリ波センサの特長は、センサのオンボードにプロセッサ・コアを組み込み、距離、速度、角度をリアルタイムで処理できるようにしたことです。また、これらのセンサ製品は高度なアルゴリズムを実装しており、人の動きに関する履歴の追跡、位置や移動の方向に基づくシステムのトリガ、サイズと動きに基づく物体の分類などの機能を実行することもできます。

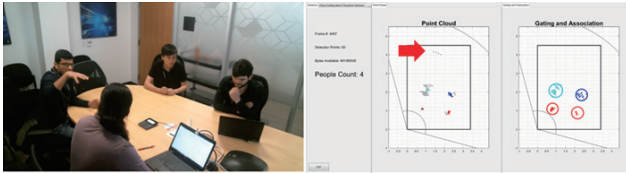


図5: 一般に、会議室には多くの静的物体が存在しており、従来型のセンサにとって誤検出の原因になる可能性がある。TIのミリ波センサは、オンボードに搭載している静的擾乱除去アルゴリズムを使用して、いすや机のような静的物体、また壁による反射(図では赤い線で表示)を無視する。

センサ側でオンボードの組み込み処理を実行する形態は、TIのミリ波センサが外部プロセッサを必要とせず、すべての動作をシングルチップで実行できることを意味します。

TIのミリ波センサ独自のデータ・セットとオンチップ処理機能により、誤検出を低減したオートメーション・システムを製作することができます。ミリ波センサは、人の入力、会話、呼吸のようなごく微細な動きを検出することができるので、占有に関する2つめの誤検出である“見落とし”を防止すると同時に、静的な物体を無視することができます。静的物体は、そのサイズと形状によっては誤検出の原因になる可能性もあります。図5に、静的擾乱除去として知られるアルゴリズムを使用して、ミリ波が静的物体を無視する方法を示します。

ミリ波センサはRF信号を送受信します。この性質上、誤検出の一般的な原因になる可能性のある環境効果に対して非常に高い耐性を示します。ミリ波センサは、周囲の照明、温度、湿度、通気や風にかかわらず高精度でセンシングを行い、降雨が発生している状況でもセンシングを継続することができます。この結果、さまざまな環境条件の下でも安定し

たセンシングを行うことが求められる屋内や屋外のアプリケーションで非常に有力な選択肢になります。加えて、この耐性は、影や天候など、環境に起因する例外的な状況に対処するために、ミリ波センサが複雑なソフトウェアを必要としないことを意味します。浴室、ロッカー・ルーム、運動場などプライバシーが重視されるアプリケーションでは、カメラや他の光学ベース・ソリューションの使用に対して非常に神経質になる必要が生じる可能性があります。

一方、ミリ波センサが使用するRF信号は電波であり、個人を識別可能な情報をシステム側に提供することはありません。このセンサの信号は、石膏ボード製の壁、ベニヤ合板、プラスチックなどさまざまな種類の材質を貫通することができます。その結果、壁の内側に隠ぺいする方法や、センサ・システムの損傷防止やクリーンな産業用の維持など、独自の設置方法が可能になります。

動作検出と人数計測用途でのミリ波

[ミリ波レーダ・センサを使用した人数追跡/計測のリファレンス・デザイン](#)は、屋内と屋外の人数計測アプリケーションでTIのミリ波センサを使用する方法を示します。このリファレンス・デザインは、RF/アナログとデジタル処理コアの両方を搭載し、オンボード・アルゴリズムを実行するIWR1642デバイスを使用しており、その結果、最大14m離れた場所から人の検出と追跡を実行することができるシングルチップ人数計測システムを実現できます。

	Short-range configuration	Long-range configuration
Hardware/EVM	IWR1642 EVM	
Field of view (antenna-dependent)	120 degrees horizontal, 30 degrees vertical	
Maximum range	6 m	14 m
Range resolution	4.8 cm	12 cm
Maximum velocity	5.17 mps	5.25 mps
Velocity resolution	0.082 mps	0.082 mps
Algorithms used	Static clutter removal, group tracking	
System power	~2 W	
Performance metrics	Tracking accuracy of >93% Counting density of 3 persons per square meter Maximum count of 20 persons	

表2: 人数計測リファレンス・デザインの性能仕様

このリファレンス・デザインは、ハードウェアとソフトウェア両方のコンポーネントで構成されています。表2に、その特長を要約します。ハードウェア・コンポーネントは [IWR1642 評価モジュール \(EVM\)](#) を活用し、アンテナにも依存しますが、視野角として水平120度、垂直30度を実現しています。ソフトウェアの観点では、このリファレンス・デザインはそれぞれ6mと14mの動作をサポートする、合計2種類の基本構成に対応しています。また、静的物体の影響を除去し、複数の人に関する移動の履歴を追跡することができる専用アルゴリズムを搭載しています。ビル・オートメーション・アプリケーションで複数の利点を確実に実現するうえで、オンボード・アルゴリズムを実行できるIWR1642の能力は重要な役割を果たします。このリファレンス・デザインは、2種類の重要なアルゴリズムを実装しています。

- 静的擾乱除去アルゴリズムを使用して、環境内に存在していても動いていない物体を無視します。このアルゴリズムは、ミリ波センサから取得した速度（ドップラー）情報を分析し、壁や家具など、静的な背景の一部とみなされる物体をフィルタ処理で除外します。一方、人間は動いている物体とみなされます。このアルゴリズムを使用すると、上位レベルのアプリケーションとアルゴリズムは人間以外の静的物体を容易に無視し、誤検出を低減することができます。
- グループ追跡アルゴリズムを使用して、複数の物体を分離し、それらを同時に追跡することができます。このアルゴリズムは、ポイント・クラウドの時間の経過に伴う履歴を監視します。場面内で動いている物体のサイズを測定し、それらの物体の位置を高精度で検出すると同時に、時間の経過に伴う物体の動きと位置の履歴を追跡することができます。この結果、上位レベルのアプリケーションは環境内で動いている各人の正確な位置と移動の持続時間を判定することができます。

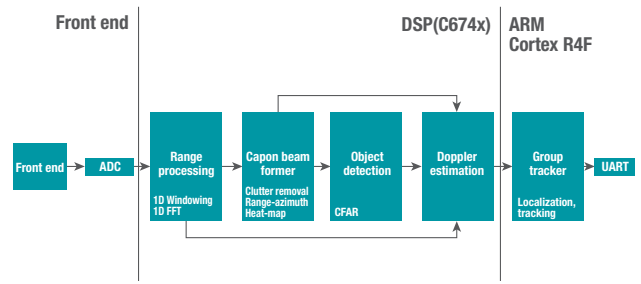


図6：人数計測のリファレンス・デザインが公開している、IWR1642のソフトウェアに実装済みの処理チェーンを示すブロック図。

これらのアルゴリズムは、IWR1642のソフトウェア内で動作するサンプル処理チェーンの形で実装済みです。図6に、この処理チェーンを示します。このチェーンは、オンボードのC674x DSP（デジタル信号処理）上と、Arm® Cortex- R4Fマイコン上の両方で動作するDSPコードという形で実装済みです。この処理チェーンの実装と前述のアルゴリズムは、チューニング可能なパラメータを採用しており、その結果、さまざまなアプリケーションとパラメータに対応できるように、ソフトウェアを調整することができます。さまざまな環境で目的的性能レベルにできるだけ近付けるために、ユーザーは複数の設定項目を微調整することができます。

TIは、さまざまなチューニングを使用して性能を維持できることを示すために、会議室、廊下、オープン・オフィス領域、エレベータなど、さまざまな環境でこのリファレンス・デザインをテスト済みです。これらのチューニングは、[Industrial Toolbox for mmWave Sensors](#)内に格納してあるチャープ・データベースの中でサンプルとして公開済みです。

また、TI Resource Explorerは、通常とは異なる環境制約の下でこのリファレンス・デザインの動作を示す実験について説明した資料も公開しています。TIは煙の多い環境でも性能を検証しました。その結果、煙や炎が存在している可能性のある非常事態のシナリオでも、ミリ波センサが人を検出して位置を識別できることが明らかになりました。また、センサが隠蔽されている状況での性能も検証しました。遮蔽物として、プレキシガラス（アクリル樹脂板）、ベニヤ合板、複数層の石膏ボードなどさまざまな種類の材質を使用し、破壊行為、環境からの保護、プライバシーなどの懸念が原因で、センサを壁の内側に隠す方法が必要とされる状況でシステムを設置した場合でも、ミリ波デバイスが機能することを示しました。

まとめ

TIのミリ波センサは、ビル・オートメーション・アプリケーションの革新を実現するために、堅牢、高精度、RFベースのセンシング手法を採用し、距離、速度、角度に関する比類のないデータ・セットを提供するとともに、強力なオンチップ処理機能を搭載しています。ミリ波センサは、直射日光、暗闇、壁越し、降雨時に課題となる環境でも付加価値をもたらします。これらの特長により、ミリ波はセンシングの優れた選択肢になっており、誤検出、プライバシー、ソリューションの複雑さ

など現在の課題の克服に貢献します。その結果、インテリジェンスとエッジ側での意思決定を達成する次世代のビル・オートメーション・センサを実現することができます。

前述の人数計測リファレンス・デザインは、オープン・ハードウェアの設計ファイルと、ソース・コード形式のソフトウェア全体を公開しています。TIは、さまざまな性能条件とニーズに応じてスケール化と調整を実施できるリファレンス・デザインの能力を示すために、さまざまな環境でこのリファレンス・デザインをテスト済みです。



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係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の、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、もしくは、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/sampterms.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。