

ロボットのAIを支える センサ・データ

次世代ロボットではセンサ・データを
エッジで処理されるAIに統合



Matthieu Chevrier
Systems and Applications Manager,
Worldwide Industrial Systems
Texas Instruments

従来の産業用ロボット・システムから現在における最新の協働ロボット(別名「コボット」)まで、ロボットが頼りにするセンサは、ますます大容量で非常に多様なデータを生み出しています。

このデータを活かすことで、ロボットが「自律的」になるために不可欠な高度な機械学習(ML) および人工知能(AI) モデルを構築でき、ロボットがリアルタイムに判断を下して、常に変化する実世界の環境内を自在に移動できるようになります。

産業用ロボットは通常「柵の中」に入られています。その中に人間が入るときには、安全性の理由からロボットの動作を停止します。しかし、人間とロボットとの協働が制限されると、享受できなくなる利点も多くあります。その点、自律機能を持つロボットなら、人間とロボットの安全で生産性の高い共存を実現できます。

ロボット・アプリケーションにおいてセンシングおよび知的認識は重要です。なぜなら、ロボット・システム、特にML/AIシステムの実際の性能は、重要なデータを供給するセンサの性能に左右されるからです。洗練度を増す現在のさまざまな高精度センサが、このようなセンサのデータすべてを一つに統合する機能を持つシステムと組み合わせられて、ロボットの認識や感覚を高めています。

AIの発展

ロボット・オートメーションはかねてから製造業部門の革新的な技術となっていますが、ロボットへのAI搭載により今後数年の間に産業界が大きく変わろうとしています。[Markets and Markets](#)の調査によると、ロボット・オートメーション・テクノロジー市場は、2016年の約2.7億ドルから2023年までには約49億ドルへと成長すると見られます。

コンサルティング企業のアクセンチュア・ハイパフォーマンス研究所は、[先進12か国の経済についてAIが与える影響力の調査](#)を行いました。この調査から、AIにより2035年までに年間経済成長率が倍増し、労働生産性が最大40%向上する可能性があることが判明しました。人間と機械が交わりあう新たな関係性が生まれ、AI制御によるロボットと協働して創造性、革新性、成長を加速させながら、働き方が変化していくと予測されています。

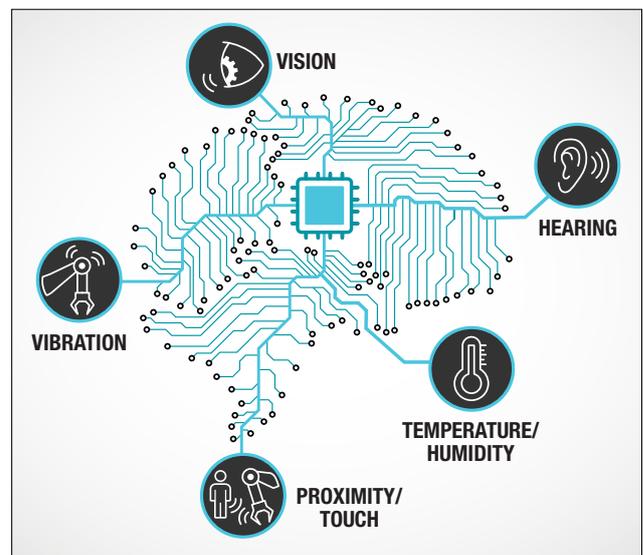


図1: ロボットのさまざまな感覚

このホワイトペーパーでは、ロボット技術および自動化における今日の重要ないくつかのトレンドと、AIが知性を持つために必要なデータをAIに結び付ける最重要技術を考察していきます。また、テキサス・インスツルメンツ(TI)のセンサがAIシステムにどのように活用(かつ統合)されているか、またロボット技術に対応するAIシステムの信号チェーン全体をカバーするセンサやデータ処理部品をTIが幅広く提供していることも取り上げます。

エッジにプッシュされるロボットのAI処理

機械学習 (ML) は、トレーニングと推論という主に2つのフェーズから成り立ちます。この2つはまったく別々の処理プラットフォームで行うことが可能です。トレーニング・フェーズは通常、オフラインのデスクトップPC上かクラウド上で行われ、大量のデータセットをニューラル・ネットワークに供給します。このフェーズではリアルタイムの処理性能や電力消費は問題とされません。トレーニング・フェーズの結果が、トレーニング済みAIシステムになります。このシステムを展開すると、組み立てラインでボトルを検分したり、部屋の中にいる人物の数を数えたりトラッキングしたり、偽造紙幣かどうかを見分けたりというような、特定の作業を実行することが可能になります。

しかし、多くの業態でAIがその期待に応えられるようにするには、推論(トレーニングされたMLのアルゴリズムを実行する部分)中に発生するセンサ・データを(ほぼ)リアルタイムで統合できるようにしなければなりません。そのため、設計者は、推論を組み込みシステムに展開して、MLおよびディープ・ラーニングのモデルをエッジに配置する必要があります。

例えば、コボットは人間と密接に協力して働くように設計されています。コボットは、近接センサに加えてビジョン・センサから得るデータを利用して、作業の際に人間を支援しながらも人間に危害を与えることのないようにしますが、これはコボットにとって難しいことです。このデータすべてをリアルタイムに処理する必要がありますが、クラウドはコボットに必要なリアルタイムで低レイテンシのレスポンスを返せるほど速くありません。このボトルネックに対処するために、現在の先進AIシステムはエッジにプッシュされています。ロボットの場、エッジとはオンボードを意味します。

分散型AIモデル

この分散型AIモデルには、次のような機能を持つ高集積プロセッサが必要です。

- さまざまなセンサとのやり取りのために介在する豊富なペリフェラル・セット
- マシン・ビジョン・アルゴリズムを実行する高性能の処理能力
- ディープ・ラーニング推論を迅速化する手法

これらのすべての機能には効率的に動作することも求められ、またエッジに配置できるように、比較的消費電力で専有面積が小さくなければなりません。

MLが普及するにつれて、消費電力とサイズが最適化された「推論エンジン」もだんだんと提供されるようになってきました。推論エンジンとは、特にML推論を実行することを目的とした専門のハードウェア製品です。

統合されたシステム・オン・チップ (SoC) は、多くの場合組み込み領域ではよい選択肢です。その理由は、ディープ・ラーニング推論を実行可能なさまざまな処理要素を収納することに加えて、SoCは組み込みアプリケーション全体をカバーするのに必要な多数のコンポーネントも統合しているからです。統合SoCの中には、ディスプレイ、グラフィック、ビデオ・アクセラレーションおよび産業ネットワークの機能を内蔵するものがあり、MLやAIを実行するにとどまらないシングルチップ・ソリューションを実現します。

エッジでAIを実行するプロセッサのよい例が [Sitara™-AM57x プロセッサ](#) です。このプロセッサには、ビデオ、タイム・オブ・フライト (ToF)、LIDAR (light detection and ranging)、ミリ波 (mmWave) といった多数のセンサと接続するための複数の高速ペリフェラルと、C66x デジタル信号プロセッサ・コアの形式の専用ハードウェア、AIアルゴリズムとディープ・ラーニング推論を迅速化させる組み込みビジョン・エンジン・サブシステムが備わります。

それでは、今日におけるロボット技術の最新トレンドをいくつか見ていきましょう。

コボット

従来の産業用ロボットでは、危険なく稼働している間も、一般的に人間はそのロボットに近づくことはできません。それとは対照的に協働ロボット (collaborative robot、略してコボットとも呼ばれる) は、ゆっくりとなめらかに動き、人間のそばで安全に稼働するように作られています。

ISO規格TS 15066の定義によると、協働ロボットとは、協働運転に利用することができるロボットのことで、ここで言う協働運転とは、製造作業においてロボットと人間が決められた作業スペース内で同時に作業を行うことを意味します（ロボットとロボットが協働するシステム、あるいは同じ場所にいるが別々の時間帯に作業する人間とロボットは除外します）。コボットを定義して展開する際には、ロボットの物理的部（またはレーザーのような事実上の拡張部）とオペレーターとの間に起こり得る衝突を予測します。そのため、センサーを使用してオペレーターの正確な位置と速度を把握することがより重要になります。

コボットのメーカーは、衝突の可能性を迅速に検出して防止するために、高度な環境センシング機能や冗長性をロボット・システム内に実装しなければなりません。コントロール・ユニットに接続される統合センサーが、ロボット・アームと人間または他の物体との衝突を検知すると、コントロール・ユニットはロボットを即座に停止します。センサーや電子回路が故障した場合もロボットは停止します。

要件の厳しい製造環境にコボットが対応できるようになるにつれ、製造業者は工場フロアにより多くのコボットを導入すると見られます。特に、厳しい投資回収率を目標にしたり、製品サイクル時間を改善したいと思っている製造業者ではそうでしょう。

ロジスティクス・ロボット

ロジスティクス・ロボットは、自走するユニットであり、倉庫、配送センター、港、大学などの人間が立ち入る可能性のある環境で動作します。ロジスティクス・ロボットは、品物を取り出して梱包ステーションまで運んだり、会社の複数の建物間で品物を搬送したりします。場合によっては品物のピッキングや梱包も行えます。このようなロボットは、一般に特定環境内を移動し、位置特定、マッピング、（特に人間との）衝突防止のためにセンサーを必要とします。

つい最近まで、ロジスティクス・ロボットはあらかじめ指定されたルートを使用していました。今では、他のロボット、人間、梱包物の位置を基に自分の進路を調整する能力を持っています。これを実現するテクノロジーとしては、超音波、赤外線、LIDARセンシングなどがあります。このように移動しながら作業を行うという特性のため、コントロール・ユニットはロボット自体に内蔵され、多くの場合はセンターのリモート・コントロールとワイヤレスで通信します。現在のロジスティクス・ロボットは、MLロジック、人間と機械の協働、環境分析技術といった先進のテクノロジーを取り入れています。

人件費の増加と行政の厳しい規制が、ロジスティクス・ロボットの採用が増加している一因です。機器、センサーなどの部品のコストの減少、さらに統合にかかるコスト（および必要な時間）の減少のおかげで、普及も進んでいます。[Technavioが行った市場調査](#)によると、世界的なロジスティクス・ロボット市場は、2018年から2022年の間に複合年間成長率で28%超も成長すると予想されています。



図2：人間のそばで働く工場のコボット

ラストマイルを配送するロボット

倉庫の棚から消費者の戸口に商品が届くまでの道のりのなかで、最終的に購入者の家に荷物が到着する最後のステップが「ラストマイル（最後の1マイル）」の配送です。これは顧客満足度の鍵となる上に、ラストマイルの配送にはコストも時間もかかります。

ラストマイルの配送コストは、全体の53%と、配送コスト合計の中でも大きな割合を占めます。このように、工程を改善し効率性を高める新しいロボット・テクノロジーの開発と実装を行う場面として、ラストマイルの配送の効率性を上げることが注目されています。

タイム・オブ・フライト(ToF)光学センサ

タイム・オブ・フライト光学センサは、ToFの原理を基盤に、アクティブ照明と合わせてフォトダイオード（シングル・センサ素子またはアレイ）を使用して距離を測定します。障害物で反射された光の波形を送信波形と比較して遅延を測定することで、距離が表されます。このデータは物体の3Dマップを作成するのにも役立ちます。

TIのToFチップセットによるToFベースのセンシングは、近接検出の範囲を超え、次世代のマシン・ビジョンを実現します。このチップセットにより、ツールを使ってロボット・ビジョンやその他のアプリケーションの設計を最大限柔軟にカスタマイズすることができます。このようなツールには、評価モジュールに加え、高度な構成が可能なカメラ開発キットが含まれています。このキットは、各ピクセルの3D位置を把握することでカスタマイズに役立つ正確な深度マップを実現します。[LIDARパルスToFリファレンス・デザイン](#)や[LIDAR用ナノ秒レーザー・ドライバのリファレンス・デザイン](#)に示すように、ディスクリット・ソリューションは、時間/デジタル・コンバータや窒化ガリウム (GaN) などの最先端のトポロジおよび半導体テクノロジーを利用します。

TIの[OPT8320](#)のような3D ToFセンサを使用すると、ロボットがネジの正確な角度を判定し、次にドライバーの微調整を行って、人間が介入しなくても常にネジの位置を揃えることができます。[OPT3101](#)のようなToFベースのアナログ・フロント・エンドは、ロボット・アームから目標物までの距離を特定し、正確な位置決めができるようにします。より分解能の高い3Dセンシングでは、DLPRテクノロジーによって実現可能な柔軟性の高い構造化照明により、分解能をマイクロメートル以下へと高めることができます。これは、[AM572xプロセッサとDLP構造化光をベースにした3Dマシン・ビジョンのリファレンス・デザイン](#)に示されています。

温度センサと湿度センサ

安全の枠内で稼働していることを保証するために、多くのロボットで、周囲の環境ならびにモーターやメインのAIマザーボードなどのロボット部品の温度と、場合によっては湿度の測定が必要です。これはロボットにとって特に重要です。なぜなら、モーターに重い負荷がかかっている状態だと、電力を多く消費し、熱を持つ可能性があるからです。正確な温度監視によりモーターを保護する一方、温度測定の精度が上がれば、安全マージンの制限に達するまではモーターを強く駆動させることができます。それに加えて、他のほとんどのセンサは温度に対する感受性が高く、熱補償の恩恵を受けません。温度を把握することで、他のセンサの温度ドリフトを補正し、より正確に測定を行うことができます。

赤道付近にある工場や熱帯気候の地域では、電子システムの保護と予知保全のために温度センサと湿度センサを使って露点温度を予測できます。

超音波センサ

まぶしい光のせいでロボットの視覚が奪われたり、ロボットが非常に暗い環境内にいるときには、ビジョン・センサが役に立たないことがあります。超音波センサは、発信した超音波が物体に反射して戻ってきたエコーを感知することで（コウモリが行う方法と類似）、暗所やまぶしい条件のときに効果を発揮し、光学センサの限界を克服します。

超音波センシングは、ロボットが高速で動作する必要がない場合に、レーダーよりも低速ですが低コストな方法です。超音波センシングは、障害物から反射される光の量に影響されないため、障害物の回避に関して光学式 ToF よりも信頼性が高くなります。例えば、超音波センシングは、物体の検出に光ではなく音波を使用するため、ガラスなどの透明な面も検知できます。

振動センサ

工業用の振動センシングは、状況監視の重要な一部であり、予知保全に不可欠です。内蔵の電子圧電性センサは、工業環境で使用される最も一般的な振動センサです。

ロボットの機械部分が損傷または老朽化した場合に、振動センサによりロボットが気づくことができるので、稼動に支障をきたす前に予知保全を実施できます。AIやMLを使用することで、このような予測の精度をさらに高めることができます。

ミリ波センサ

ミリ波 (mmWave) センサは、無線周波数の電波とそのエコーを使用して、速度、角度、範囲の3つの要素を測定することにより、移動する物体の方向と距離を判断します。物体がどれくらい速くセンサに近づいてくるかをミリ波センサで感知することで、ロボットがより予測的に行動することができます。レーダー・センサは暗所で優れた性能を発揮し、石膏ボード、プラスチック、ガラスなどの材料を通して感知することができます。

相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) ミリ波レーダー・センサは、視野内の物体の距離だけでなく、あらゆる物体との相対速度も高い精度で測定できます。

小型で軽量な TI の高集積シングルチップ・ミリ波レーダー・センサは、センサのエッジ内でリアルタイムに処理を行うことができ、プロセッサを追加する必要はほとんどありません。ミリ波テクノロジーにより、小型 LIDAR レンジ・ファインダーに比べて3倍も小さく重量が半分の設計を実現できます。そのため BOM (部品表) コストの低減、センサの小型化を実現し、さらに中央コントローラ・プロセッサからビジョン・ベースのシステムに対して必要とされる MIPS (100万命令/秒) 値も削減されます。外部レンズや開口部、センサ露出面を設けずにプラスチック筐体の内部に直接設置できるので、ミリ波センサは非常に堅牢で、保護等級規格 (イギリス・プロテクション) 69K を満たすことができます。

ミリ波センサは、その初期には高価でサイズも大きく、ディスクリット部品がいくつも必要でした。ただし、現在では TI が無線、演算処理、メモリといったリソースを単一のモノリシック CMOS に統合したことにより、現在ロボット分野で確立されているセンシング技術を今後数年でミリ波センサが補完または置き換えると言ってもさしつかえないでしょう。

より高度なレーダー・センシング・システムでは、慣性計測機器を追加し、場合により GPS で強化することで、精度の高いオドメーター (路程測定) を実現できます。ロボットが平らではない地面を通過する場合や、多数のピッチやヨーイング (縦揺れや横揺れ) がシャーシで発生する場合に、ミリ波センサは地表に向けてチャープ信号を発信し、返ってきた信号のドップラー偏移を測定することで、さらにオドメーター情報を提供できます。

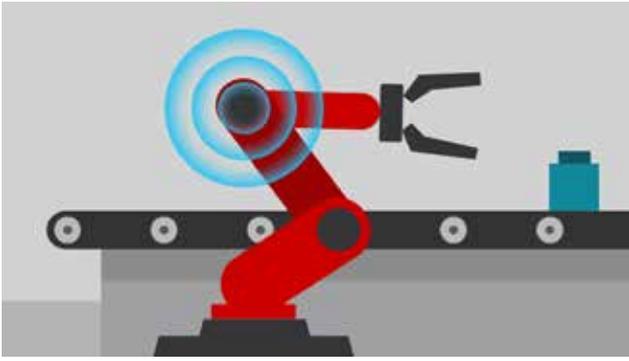


図3: ミリ波センサを使用するロボット・アーム

AIロボット信号チェーン全体に対処する TIのソリューション

適応的で自律学習型のAIロボット・システムの信号チェーンには、多様なセンサ・データをリアルタイムで統合することが求められます。ロボットのセンサは、ある意味人間の五感のようなもので、完全に自律的な動作には人間のすべての感覚が不可欠です。それぞれの感覚が脳内の別々の場所を使用し、脳の部分をどれくらい使用するかもさまざまです。例えば、視覚には聴覚や嗅覚よりも多くの脳の働きが要求されます。

それと同じで、ロボットでは、ロボット内で機能するAIおよびMLのシステムにさらに多くのセンサが接続されるようになるでしょう。それに伴いAIロボット・システムの製造で重要となる課題は、ハイブリッド・センサのデータで駆動されるハイブリッドMLシステムにおいて、相互に通信しながら連携して稼動する複数のAIシステムに対処する必要性です。

ロボット開発者は、回路の設計や認定に関わる悩みを減らすために先進の集積回路ソリューションを求めており、製品開発をスピードアップし、産業界の顧客へとすばやく製品を提供することを目指しています。産業用ロボットの進歩を支えるIC製品には、精密なセンシング、高速なセンサ信号変換、リアル

タイム応答のための高速計算や信号処理、そして高速通信が必要です。また、ICは、窒化ガリウム (GaN) 電界効果トランジスタ (FET) のような最新半導体を利用して、高効率かつ小型の電源も実現します。新たなICにより、業界に新しい規格も生まれます。例えばシングル・ツイストペア・イーサネットや給電シングル・ツイスト・ペアは、配線を単純化し、信頼性を高めます。

TIは、AIロボット信号チェーンを網羅する製品およびソリューションのポートフォリオを幅広く用意し、次世代ロボットに必要とされるセンサからプロセッサまですべてを取り揃えています。センサ入力からアクチュエータやモーター出力まで、個々の機器ユニットから工場レベル、そしてそのレベルを超えるコントロールまで、TIのソリューションは、信号チェーン、およびロボット・アプリケーションに必要な処理や電源に対応します。製品は強化絶縁などの機能を備え、過酷な産業環境での使用に関して試験され、合格しています。

高度にインテリジェントで洗練された現在のロボット・システムの開発を実現する [TIのアナログおよび組み込みテクノロジーについて、詳しくはこちら](#)をご覧ください。

関連 Web サイト:

- [「自律産業用システムを支える機械学習」](#) ホワイトペーパー
- [「組み込みシステムへのディープ・ラーニングの導入」](#) ホワイトペーパー
- マッキンゼー&カンパニー [“How customer demands are reshaping last-mile delivery”](#) および [“Human + machine: A new era of automation in manufacturing”](#)



重要なお知らせと免責事項

TI 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黙示保証、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、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 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 TI 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が適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、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 TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI 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。TI 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、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、TI の販売条件 (www.tij.co.jp/ja-jp/legal/termssofsale.html)、または ti.com やかかる TI 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。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI 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。

Copyright © 2019, Texas Instruments Incorporated

日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社