完全自動運転に向けた、自動運転車におけるセンシングの課題

ジェフ・ヘクト

新しいセンシング技術は、既存の運転支援システムの成功を基盤とした、完全自動運転車の実現に役立っている。

当初はハイエンドモデルのオプションとしてしか提供されていなかった運転支援技術が、徐々に主流市場において受け入れられつつある。アダプティブクルーズコントロール（車間距離制御装置：ACC）が1990年代に導入された後、カメラやレーダーに基づくブラインドスポットモニタリング（死角検知装置：BSM）、車線制御、自動ブレーキがそれに続いた。自動車のブレーキをかけて後方衝突を防ぐ衝突回避システムは、欧州連合（EU）では2022年5月から新車への搭載が義務付けられ、米国では多くの新型モデルに標準装備されるようになっている。安全性関連のアナリストらは、自動ブレーキによって衝突事故による死者数は、最大20%減少する可能性があると予測している[1]。

そうした機能の装備と強化は、完全自動運転に向けた明らかな道すじであると思われていた。

しかし、2021年8月のアンケート調査で、完全自動運転車に乗りたいと回答した成人はわずか23%で、その3年前の19%よりは増加したものの、未だ不安を感じさせる結果にとどまっている[2]。残念ながら、大々的に報じられた自動運転車による死亡事故が、世間の支持を損なっている。米ウーバー社（Uber）は2020年12月にこの事業から身を引き、同社のロボタクシー開発プログラムを売却した。米ウェイモ社（Waymo）は2021年初頭に、自社の車両を「自動運転車」と呼ぶことを止めた[3]。米テスラ社（Tesla）が2021年に、オートパイロット機能を装備する自動車を90万台以上販売したという明るいニュースにさえも、それらの車両は完全自動運転車ではないという事実と、オートパイロットモードで走行していたテスラ車によって、1人の救急隊員が死亡し、17人が負傷した11件の事故の調査を、米国運輸省道路交通安全局（National Highway Transportation Safety Board：NHTSA）が2021年8月に開始したことが、影を落とした[4]。

自動運転車の目と頭脳をアップグレードする時が来たようだ。

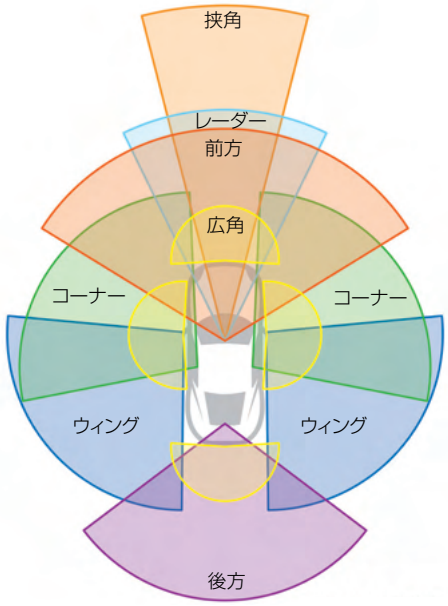

図1　運転支援と自動運転のための自動車のカメラ配置。（提供：オムニビジョン社）

センサと人工知能

目とは、自動車周辺の全方向を監視するセンサで構成されるネットワークで、頭脳とは、保存されたデジタルマップなどのデータに紐づけられた高性能なコンピュータ上で実行する人工知能（AI）システムある。ソフトウエアは、センサデータなどの情報を解析して、歩行者や他の車両を追跡し、その動作を予測し、安全に走行するために自動車が進むべき経路を計算する。

データの収集と処理は、どちらも複雑なリアルタイム操作である。光の伝播時間さえもが重要になる。LiDAR（ライダ）またはレーダーパルスは、1マイクロ秒で光源から目標物までの150mの距離を往復する。主要なセンサは、カメラ、マイクロ波レーダー、ライダだが、多くの自動車がそれ以外にも、

超音波を利用して自動駐車を行い、GPS信号を収集してデジタルマップ上の車両の位置を特定する。

システム全体の設計、統合、最適化は複雑である。ロボティクスを手掛ける米パーセプトイン社（PerceptIn）のエンジニアらは2020年に、同社の過去3年間のR&D予算の約半分が、コンピューティングシステムの構築と最適化に費やされたと報告し、次のように述べた。「自動運転には、コンピューティングとセンサの領域にまたがり、新たな設計制約を伴う、無数の異なるタスクで構成されていることがわかった。個々のアルゴリズムの加速化は非常に貴重だが、最終的に重要なのは、体系的な理解と、エンドツーエンドシステムの最適化である」[5]。

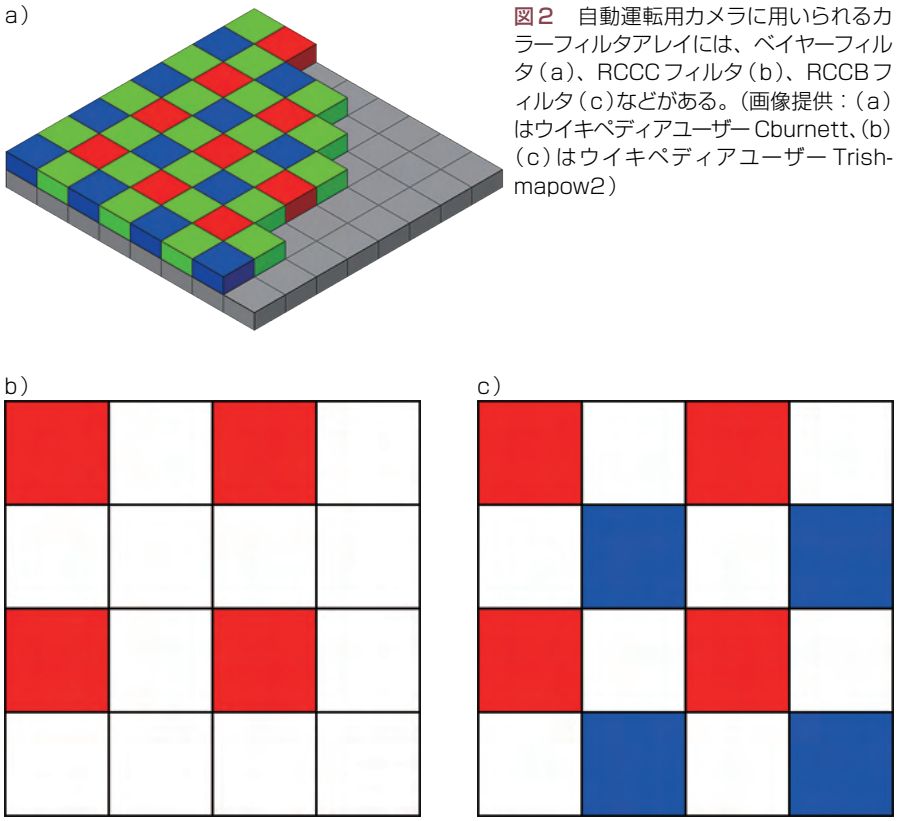

図2　自動運転用カメラに用いられるカラーフィルタアレイには、ベイヤーフィルタ（a）、RCCCフィルタ（b）、RCCBフィルタ（c）などがある。（画像提供：（a）はウイキペディアユーザーCburnett、（b）（c）はウイキペディアユーザーTrishmapow2）

運転支援と自動運転のためのカメラ

カメラセンサは、十分に開発されていて安価になっており、先進運転支援システム（Advanced Driver Assistance System：ADAS）と自動運転（Automated Driving：AD）システム用に大量に販売されている。すべてにシリコン検出器が採用されているが、細部はシステムの種類や自動車メーカーによって異なる。ADASカメラは、バックミラーの裏に搭載された小さなプロセッサを使用し、ADカメラは、自動車の外周に取り付けられて、車両内部の中央コントローラへのデータリンクを備える。

図1は、これら2種類のシステムにおけるカメラの標準的な位置を示している。橙色は、走行車両の前方の危険を検知するためにADASカメラが使用する、広角の主視野領域と挟角の長い視野領域を表している。自動運転車は、車両の360°全方向を網羅するために、側面と後部にもカメラが搭載されており、図には短距離カメラと長距離カメラの視野が示されている。紫色で示されているのは、後方カメラの視野である。

カメラチップの供給メーカーである米オムニビジョン社（Omnivision）のアンディ・ハンビー氏（Andy Hanvey）によると、カメラには、視野とレンジ以外にも数多くの特性が存在するという。自動車には、ADASとAD用のマシンビジョンチップ、サラウンドビューとリアビューカメラのための視覚用チップ、ドライバーを監視するための車内チップという、3種類のカメラが使用されている。それぞれが特定機能向けに最適化されており、検出器アレイは通常、カラー写真用の一般的なRGBパターンであるベイヤー配列（**図2**a）とは異なるフィルタアレイとなっている。

マシンビジョンチップは、近くにある他の車両や物体の位置や動きの追跡に使われるデータを、AIシステムに供給する。使用される4要素フィルタは、グレースケール処理用に最適化されており、ドライバーに表示するためのものではない。一般的に選択されるのは、1つの赤色要素と3つのクリア要素からなるRCCCフィルタである（図2b）。RCCC画像は、目にはモノクロに見えて、カラー画像を記録することはできない。3つのクリアフィルタによって、感度は最大になり、赤色フィルタは、ブレーキや交通信号の赤い光を識別する。

もう1つの選択肢は、赤色フィルタが1つ、クリアフィルタが2つ、青色フィルタが1つのRCCBである（図2c）。これは、カメラ出力がマシンビジョンプロセッサに加えて、車両周囲のリアビューやサイドビューを表示するドライバーディスプレイにも供給されるために、色が必要となる場合に魅力的である。類似の選択肢が、赤、黄、黄、シアンの4要素で構成されるRYYCyフィ

図3　(a)木の葉が落とす影によって、淡い色の縁石が覆われ、路上のドライバーからは見えにくくなっている。(b)歩道の歩行者の視界は、それよりも良好である。(写真提供:ジェフ・ヘクト)

ルタで、これは、一部のハイエンドカーで提供されている車載DVRにおける色再現や録画にも使用できる。

マシンビジョン用のその他の重要な特性としては、視野、分解能、ダイナミックレンジがある。完全自動運転の場合は、要件がさらに押し上げられて、800万～1500万のピクセル数、140°～160°の視野、120～140dBのダイナミックレンジの他、夜間運転のための良好な低光量性能などが求められる。ドライバーに表示される、リアビューとサイドビューの画像に対するピクセル数の要件は、それよりも低い。

3つめの種類のカメラは、ドライバーの警戒心と注意力に加えて、車内のその他のセキュリティを監視するものである。この用途には、RGB-IRという別のフィルタ構成が採用される可能性がある。シリコンレンジの近赤外領域は、ドライバーには見えないので、その注意を妨げることなくドライバーの顔からの反射光を監視することができる。可視光は、セキュリティやその他のイメージングに利用できる。

漫然運転や不注意な運転は、安全性の問題として古くから認識されており、初期のテスラ車の死亡事故でもそれが明らかだった。米ゼネラルモーターズ社(General Motors)の「Super Cruise」や、米フォード社(Ford)の「BlueCruise」と同様に、テスラ社はドライバー監視機能を標準装備としている。EUはさらに一歩踏み込んで、2024年には、EU域内で販売されるすべての新車に、ドライバーの眠気や注意散漫の兆候を監視する、ドライバー監視システムの装備を義務付ける予定である。

天候の制約

カメラは可視光に依存するため、目をくらませるまぶしい太陽の光や、光を吸収して信号を低下させる霧や降雨など、人間の視覚を損なう可能性のあるものと同じ環境的悪条件に対して脆弱である。自動車に搭載されるデジタルカメラのダイナミックレンジは、120dB(CCDのビット深度は20)以上で、夜間と昼間の両方で公称120dBとされる人間の目と同等である。しかし、両者はピーク色感度が異なる。人間の目は、緑色に対する感度が最も高いが、シリコンの色感度はそれよりも均一であるため、RGB写真カメラは、赤色または青色の各素子に対して2つの緑色素子を使用して、人間の視覚を模倣する。

環境光レベルには、120dB以上の差が生じる可能性があり、それがカメラセンサにとって問題になる可能性がある。自動車部品メーカーの仏ヴァレオ社(Valeo)は、天候と光を分類するためのデータセットを開発したが、一層の取り組みが必要だと述べている。

影は、天候、1日のうちの時間、季節によって変化する可能性があり、人間とカメラの両方にとって扱いにくい問題である。**図3**は、特定の時間帯と視野角において、影によって縁石とアスファルトの間のコントラストが低下し、縁石の段差がわかりにくくなる可能性があることを示している。影が縁石を覆う数時間は、その影のせいで車を縁石に乗り上げてしまい、タイヤを傷つけてしまう可能性がある。

ステレオカメラによる距離測定

ステレオカメラは、物体までの距離を測定することができる。2つの異なる点から画像を撮影して、画像内の物体の位置の違いを観測することによっ

て、これを行う。物体までの距離（レンジ）は、画像を撮影する2つの点の間の距離に比例する。デジタルカメラの場合は、右側と左側のカメラのピクセル列の位置がずれていると、距離の見積もり精度が低下する。

「左と右のカメラの相対向きが1/100度ずれるだけでも、出力深度マップは完全に台無しになる恐れがある」と、新興企業である米ノダー社（NODAR）を創設したリーフ・ジャン氏（Leaf Jiang）は述べた。車載ライダの場合、そのずれが自動車の使用期間を通して安定している必要がある。最先端の機械工学で安定性を維持することのできる最大間隔は約20cmで、これによって測定距離は、約50mまでに制限される。

カメラの間の間隔を広げて、ステレオカメラのレンジを拡大するために、ノダー社は、フレームごとにカメラ結果を安定化させるための2段階からなるソフトウエア処理を開発したと、ジャン氏は述べた。最初に固定フレームを基準として画像を校正または整流してから、各ピクセルペアのステレオ対応問題を解決する。これによって、ステレオカメラを最大で2m（自動車の幅に相当）離すことが可能となり、従来カメラのレンジの10倍に相当する、500mまでの正確な距離測定が可能となる。カメラは、単一フレームに固定する必要はなく、ただ視野が重複するように配置するだけでよく、一般的には車両前面の右側と左側に搭載される。

単一の処理システムによって、イメージングと測距の両方が行われる。カラーカメラは、色分けされた点群を生成することができる。システムは、視野を高密度でサンプリングするため、緩んだマフラーや取れかかったレンガ、道路の穴など、車両の邪魔になる可能性のある小さな物体を検出して回避することができる。長い距離は、前方視界においても後方視界においても最も重要なものだと、ジャン氏は述べた。

マイクロ波レーダー

マイクロ波レーダーはコストが低いため、距離を測定するために車両の周囲に複数搭載することが容易に可能で、悪天候時の検知性能が可視光よりもはるかに優れている。77GHz帯の高周波レーダーは、運転のための長距離の測定が可能で、24GHz帯の短距離レーダーは、駐車や死角検知を支援することができる。しかしレーダーは、歩行者を認識して追跡したり、高さを判断したりすることはできないため、道路上方にある橋や標識、下がオープンスペースになっているトレーラーを正しく認識できない可能性がある。このような制約により、ADASやADにはその他のセンサが必須である。

コンピュータビジョンシステムを開発するために創設された、イスラエルのモービルアイ社（Mobileye）は、レーダーの低いコストを活用して、その役割を拡大することを計画している。モービルアイ社の創設者で最高経営責任者（CEO）のアムノン・シャシュア氏（Amnon Shashua）によると、「（現行の）レーダーは、タイトな間隔に対応できないため、スタンドアロンのセンシングとしては使い物にならない」という。同社はこの問題を克服するために、より高い分解能を持つように構成されたソフトウエア定義のレーダーを開発している。「適切なアルゴリズムを適用したレーダーは、（ディープラーニングによって最大50mの距離に対して）非常に高い分解能を発揮することができる」という。モービルアイ社は、同社が開発中のレーダーは、ライダにほぼ匹敵する性能を達成可能だとしている。

今後の展望

先進的なセンシングシステムには、車載用途向けに設計された高度なプロセッサが必要である。米エヌビディア社（Nvidia）は最近、自動運転レベル4での走行を対象に設計された「NVIDIA Drive」を発表した。12台の外部カメラ、3台の車室内カメラ、9台のレーダー、2台のライダを搭載している。特殊なプロセッサとソフトウエアは、自動運転車の目として機能する各種センサによって収集された信号を処理するために不可欠な頭脳である[6]。

運転支援機能とセンサの能力は十分だが、自動運転が苦戦しているのは、AIが運転の複雑さを理解しきれていないためである。AIは、複雑だが一貫性があり、明確に定義されたルールに基づいて人間の知能を試す、チェスやその他のゲームで世界王者に勝利している。しかし、「路上のルール」は明確には定義されておらず、厳格に適用されているわけでもないため、AIは運転には失敗をする可能性がある。また、消えかけた車線や、ライトを点滅させながら路上に停車している緊急車両など、予期せぬ状況にAIは適切に対応できない。停車中の消防車に衝突するというのは、悪い運転の代表例だが、自動運転車によるそうした事故は複数回発生している。そのような気まずい事故歴を持つ車に乗ることに、人々が慎重になるのも無理はない。業界が直面する大きな課題の1つは、もっとうまくやれることを世間に納得してもらうことである。

参考文献

(1) See https://bit.ly/3uqaMFE.
(2) See https://bit.ly/3AUKsER.
(3) See https://bit.ly/3sbOgxG.
(4) See https://bit.ly/34edTpu.
(5) See https://bit.ly/32Wj8tf.
(6) See https://bit.ly/3Ht6Pn8.

LFWJ