

自動運転のための 高精度センシング技術

環境認識、運転者検知と画像認識AIプロセッサの実際

監修 室 英夫



閲覧期間内における二次の利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

監修・執筆者一覧 (執筆順・敬称略)

【監修】

室 英夫 一般社団法人次世代センサ協議会 理事

【執筆者一覧】

室 英夫 一般社団法人次世代センサ協議会 理事

倉元 昭季 東京工業大学工学院 助教

伊東 敏夫 芝浦工業大学システム理工学部 教授

秋田 時彦 豊田工業大学スマートビークル研究センター 特任上級研究員

三田 誠一 豊田工業大学名誉教授

青柳 靖 古河 AS 株式会社第 3 技術本部 主幹研究員

加藤 正浩 パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社ソフトウェア技術部
開発 1 課

辻田 亘 三菱電機株式会社先端技術総合研究所センサ情報処理システム技術部
グループマネージャー

山下 元気 三菱電機株式会社先端技術総合研究所センサ情報処理システム技術部 研究員

佐保 賢志 富山県立大学工学部 講師

原 英之 株式会社いすゞ中央研究所研究第五部 主任研究員

前田 賢一 一般社団法人次世代センサ協議会 理事

高橋 敦郎 コーンズテクノロジー株式会社電子通信ソリューション営業部 リーダー

Andreas Just Toposens GmbH Marketing Head of Marketing

大澤 定夫 BOLDLY 株式会社市場創生部 シニアプロジェクトマネージャー

吉田 豊 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 研究員

早野順一郎 名古屋市立大学大学院医学研究科 教授

得竹 浩 金沢大学大学院自然科学研究科 教授

寺西翔一郎 金沢大学大学院自然科学研究科

- 佐野 徹 東芝デバイス&ストレージ株式会社デバイス&ストレージ研究開発センター
スペシャリスト(主務)／株式会社東芝研究開発センター知能化システム技術セ
ンターエッジ AI 技術開発部 スペシャリスト
- 藤本雄一郎 Lead Innovation センター株式会社 代表取締役／
大阪大学大学院工学部 招聘准教授
- 柴田 義孝 岩手県立大学研究・地域連携本部 特任教授
- 櫻庭 彬 岩手県立大学研究・地域連携本部 客員研究員
- 田村 宏樹 宮崎大学工学教育研究部 教授
- 櫻井 啓子 宮崎大学工学教育研究部 研究員
- 島内 匠 宮崎大学工学研究科
- 平沢 浩一 KOA 株式会社技術イニシアティブ技創りセンター 職人(上传)
- 塩見 幸広 トヨタ自動車株式会社シャシー開発部 主査



総説

自動車用センサと自動運転

室 英夫

1 はじめに	3
2 自動車用センサの概要	6
3 自動車用センサの変遷	8
4 MEMS センサ	11
5 環境認識用センサ	13
6 自動車用センサの今後の動向	14

第1編 自動運転の環境認識装置と車両制御

第1章 環境認識装置

第1節 イメージセンサ

第1項 安全走行補助のための単眼カメラを用いた周囲物体の3次元位置推定

倉元 昭季

1 はじめに	19
2 単眼カメラでの交通参加者の相対位置認識の概要	20
3 結果と考察	26
4 結 言	30

第2項 深層学習による車載単眼カメラを用いた横断歩行者の検出

伊東 敏夫

1 はじめに	33
2 深層学習以前の検出法	34
3 深層学習による歩行者検出	36
4 まとめ	41

第2節 ミリ波レーダを用いた物体種別識別・形状推定技術

秋田 時彦／三田 誠一

1 はじめに	43
--------	----

2	ミリ波レーダによる物体種別識別	43
3	ミリ波レーダによる駐車車両形状推定技術	49
4	まとめ	55

第3節 準ミリ波帯を利用した車両周辺監視システム

青柳 靖

1	はじめに	57
2	周辺監視レーダの位置づけ	58
3	レーダシステムの開発	59
4	評価結果例	61
5	おわりに	63

第4節 MEMS ミラー型 LiDAR を用いた自己位置推定技術

加藤 正浩

1	はじめに	65
2	MEMS ミラー型 LiDAR の概要	66
3	自己位置推定システム	67
4	一般道路での自己位置推定手法	70
5	自己位置推定実験	73
6	まとめ	76

第5節 超音波センサ

第1項 超音波センサを活用した自動駐車システム

辻田 亘/山下 元気

1	はじめに	79
2	超音波式自動駐車システムの概要	79
3	超音波センシングによる駐車空間の認識	82
4	まとめ	88

第2項 超音波距離センサなどセンサ融合による目標追尾

佐保 賢志

1	はじめに	91
2	超音波距離センサと速度・加速度センサの融合による追尾システム	91
3	追尾フィルタの最適設計	96
4	歩行者追尾への適用例	101
5	まとめ	103

第2章 認識と制御

第1節 外部環境認識

第1項 マルチタスク深層学習を用いた自動運転画像認識

原 英之

1	はじめに	105
2	学習に用いるネットワーク	106
3	学習条件	108
4	学習結果および検討	110
5	距離推定の統合と認識結果の例	113
6	おわりに	115

第2項 イメージセンサによる障害物検知技術の現状と課題

前田 賢一

1	はじめに	117
2	基本的な問題：何を検知したいのか？	117
3	センサと検知との差	118
4	画像の優位性	118
5	脳に相当する仕組み	119
6	今後の課題	124

第3項 Toposens 社製 3D 超音波センサ、自動運転で活躍する超音波の目

高橋 敦郎 / Andreas Just

1	概要	127
2	近傍環境(0 ~ 5 m)の検知	127
3	ジェスチャーコントロールとして	128
4	車内乗員監視として	128
5	おわりに	130

第2節 自動運転バスの車載制御装置と遠隔監視システム

大澤 定夫

1	はじめに	131
2	車載制御装置と遠隔監視システムの必要性	131
3	自動運転バスの車載制御装置概要	133
4	自動運転バス時代の運行管理システム「Dispatcher」	134
5	各地で行う自動走行実証実験	138
6	なぜ実証実験を行うのか	141
7	おわりに	141

第3節 運転者検知

第1項 心拍変動時系列によるドライバーの眠気検知アルゴリズム

吉田 豊/早野 順一郎

1	まえがき	143
2	実験方法	143
3	解析方法	144
4	結果	146
5	考察	148
6	まとめ	149

第2項 ドライバーの視線移動モデルの同定とドライバ状態の推定

得竹 浩/寺西 翔一郎

1	緒言(オペレータモデルの有用性)	151
2	オペレータモデルの利用	151
3	視線移動モデルへの応用	152
4	ドライバーの視線移動モデルと注意力	153
5	まとめ	156

第3章 画像認識 AI プロセッサ「Visconti™」

佐野 徹

1	車載向けセンシング・画像処理プロセッサ	159
2	画像認識ベースの ADAS	159
3	車載向けの画像認識 SoC における課題とは?	160
4	低消費電力動作に最適化した Visconti	161
5	独自開発の専用アクセラレータ群	163
6	機能安全対応	171
7	チップの消費電力計測例: 2.73 W での動作を確認	173
8	まとめ	173

第4章 車載アーキテクチャのゲームチェンジ

— 末端側のセンサ機能進化から、中央側のセントラルコンピューティング制御へ —

藤本 雄一郎

1	はじめに	175
2	車載アーキテクチャの変革	175
3	今後の自動車業界の競争力とシステムアーキテクトの必要性	180
4	おわりに	181

第2編 高精度センシング技術

第1章 多様な車載センサなどによる道路状況収集転送システム

柴田 義孝／櫻庭 彬

1	はじめに	185
2	関連研究	186
3	道路状況情報プラットフォーム	187
4	路面状態センサシステム	189
5	V2X 通信システム	191
6	プロトタイプシステムと社会実験	191
7	結 論	196

第2章 視線情報を用いた自動車の運転評価に関する研究・開発

田村 宏樹／櫻井 啓子／島内 匠

1	はじめに	199
2	視線検出装置について	199
3	テンプレートマッチングを用いた顔角度推定システム	200
4	画像処理を用いた信号機のある交差点における自動車運転評価システム	202

第3章 シャント抵抗器を使用した電流センシングのノウハウ

平沢 浩一

1	シャント抵抗器の由来	207
2	電流経路形状と電圧検出端子引き出し位置による抵抗値と抵抗温度係数の変化	208
3	インダクタンス影響とその軽減策	215
4	電流検出抵抗器のサーマルマネジメント	219

終 説

自動運転実現に向けた国際法規議論

塩見 幸広

1	国連自動車基準調和世界フォーラム(WP.29)における自動運転国際法規検討体制構築	225
2	自動運転フレームワークドキュメント	228
3	自動運転としてのALKS 国際法規	231
4	今後の自動運転国際法規議論展望	237

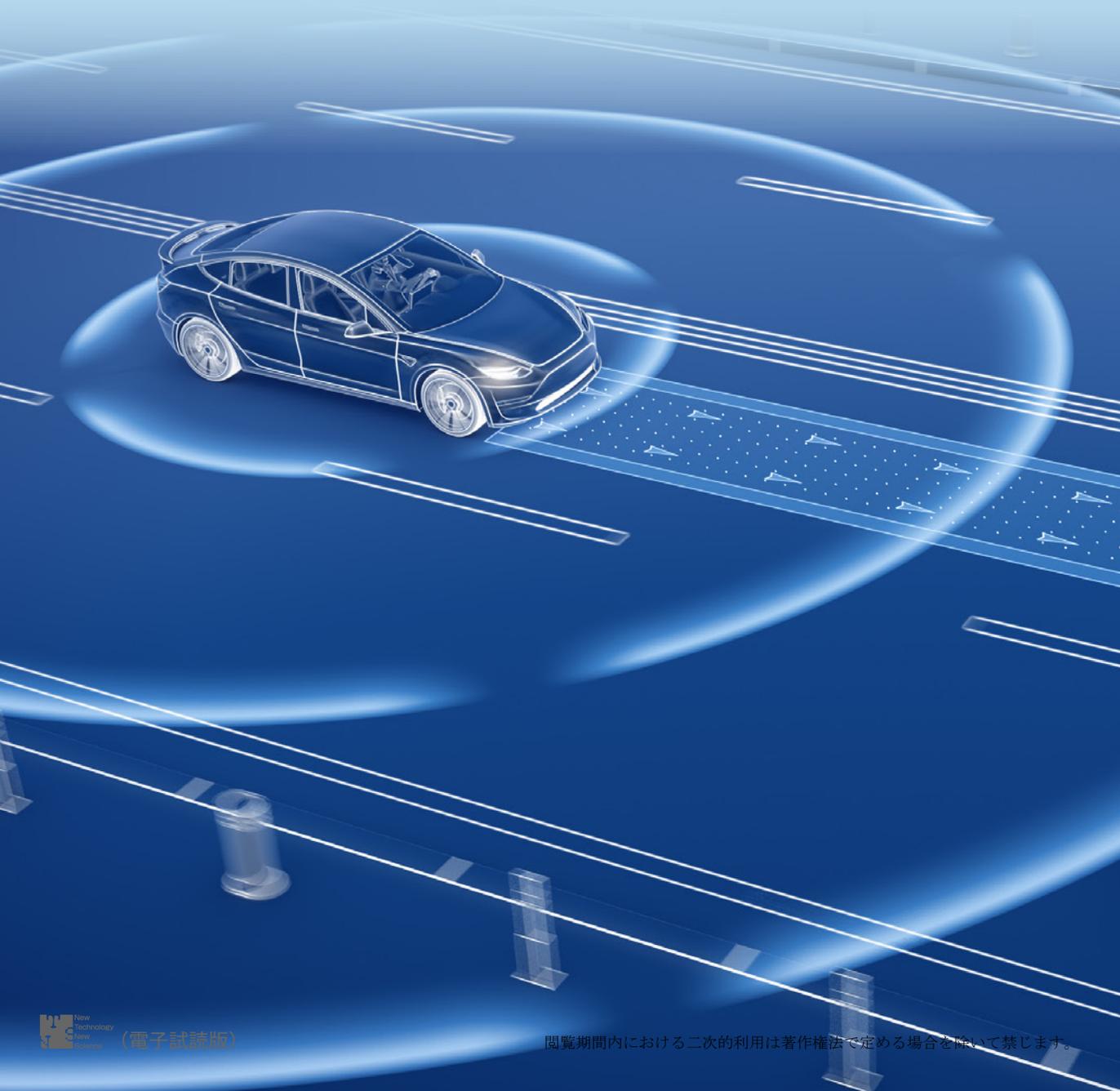
※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、必ずしも商標表示(®、TM)を付記していません。

閲覧期間内における二次の利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

総 説

自動車用センサと自動運転

一般社団法人次世代センサ協議会 室 英夫



閲覧期間内における二次の利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

1 はじめに

近年高齢者による交通事故や公共交通における労働力不足と関連して、自動運転の話題がニュースや雑誌記事などいろいろな場面で取り上げられるようになり、社会の関心も高くなっているように思われる。また一般道において自動運転のバスやタクシーの試験的運用も実施され、実用化に向けた課題の抽出や基礎データの蓄積も行われるようになった。自動運転の実現においては運転操作の判断を行うための人工知能(AI: Artificial Intelligence)とともに周囲の環境や車両状態を検出するためのセンシング技術が極めて重要な役割を果たすと考えられる。このような背景から本稿では自動車用センサの概要についてまとめることとした。最初に自動車と自動運転・運転支援のベースとなるカーエレクトロニクス発展の歴史を振り返りたいと思う。

自動車は馬車に代わる移動・輸送手段として18世紀に蒸気自動車としてその歴史が始まり、19世紀後半にはガソリン・エンジンを用いた最初の4輪ガソリン自動車が開発された。それ以降改良が重ねられ、20世紀初頭の米国Ford Motor社のモデルT、通称T型フォードにおいて大量生産技術が確立された後、本格的な普及期へと入っていった。日本においても自動車産業は戦後の産業復興の大きな原動力となり、1960年代半ばのいざなぎ景気時代には自動車(Car)はカラーテレビ(Color Television)、クーラー(Cooler)とともに耐久消費財の新・三種の神器として宣伝され、3Cとも呼ばれて一般に普及するようになった。図1に1966(昭和41)年から現在に至るまでの日本における軽自動車を含む自動車保有台数の推移のグラフを示す¹⁾。1966年に約230万台であった乗用車の保有台数はその後急激に増加し、平成が始まる1989年には3000万台を超えるレベルに至った。その後バブル景気を機にさらに急激な増加を見せ、21世紀に入って飽和傾向を示し、最近では6000万台程度となっている。これに貨物車や二輪車なども加えた自動車保有台数の合計は8000万台程度で現代の社会における不

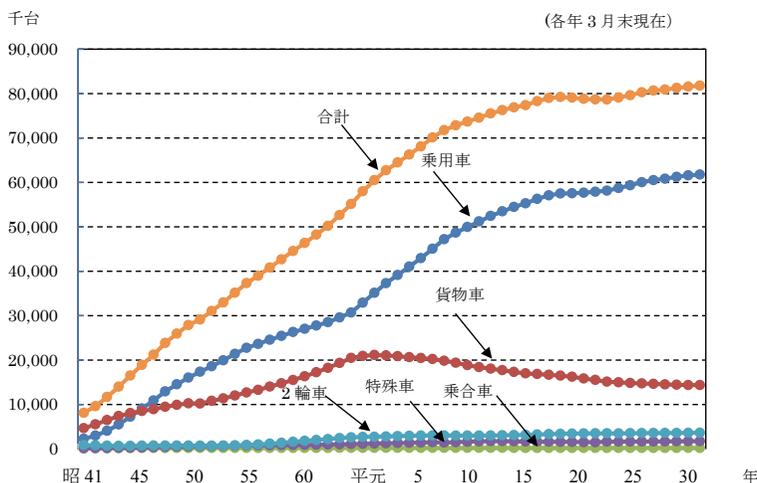


図1 自動車保有台数の推移(軽自動車を含む)¹⁾

総 説

表 1 ガソリン乗用車の排出ガス規制値推移²⁾

Test mode	Pollutant	S48	S50	S53	H2	H12	H17	H21
10 mode (g/km) (Hot start)	CO	18.4	2.10	2.10	2.10	0.67	1.15	1.15
	HC	2.94	0.25	0.25	0.25	0.08	0.05	0.05
	NO _x	2.18	1.20	0.25	0.25	0.08	0.05	0.05
	PM							0.005
11 mode (g/test) (Cold start)	CO		60.0	60.0	60.0	19.0		
	HC		7.00	7.00	7.00	2.20		
	NO _x		4.40	4.40	4.40	1.40		

- ・ H2 年規制より，10 モード→10-15 モードに変更
- ・ H17 年規制より，炭化水素(HC)規制を非メタン炭化水素(NMHC)に変更
- ・ H21 年規制より，JC08 モードによりホットスタート 75%，コールドスタート 25%に変更
また，PM については，ガソリン直噴リーンバーン車にのみ適用

可欠な交通手段となっている。

自動車は移動と輸送における効率・利便性を大幅に改善し，社会と産業の発展に大きく貢献してきたが，世界中に大量に普及したために排気ガスによる大気汚染や二酸化炭素ガス放出による地球温暖化，交通事故による死傷者数の増加など負の側面も顕在化し，それらへの対応が新しい技術の創出へと繋がっていった。表 1 にガソリン乗用車の排出ガス規制値の推移を示す²⁾。1970 年代一酸化炭素(NO)について始まった自動車の排気ガス規制はその後炭化水素(HC)および窒素酸化物(NO_x)にも拡大され，その規制値は年々厳しい値へと見直されていった。これらの排気ガス規制への対応に大きく貢献したのが，1970 年代に始まった電子式燃料噴射を実現させたようなカーエレクトロニクスの技術であり，その核心となるのがプログラム制御を行うマイクロコントローラ，制御に必要な情報を収集するための自動車用センサなどである。これらの技術は半導体技術の進歩や MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサの実用化により着実に進化を続け，シャシ制御システムやエアバッグなどの安全システムへと幅広く展開されていった。

交通事故については日本では戦後の自動車の普及とともに徐々に増加していき，1970 年代中頃のピークを境に一時期減少したものの再び上昇に転じ，元号が平成へと変わる 1980 年代後半には年間交通事故死亡者数は再び 1 万人を超え，大きな社会問題となった。図 2 は 1948 (昭和 23) 年以降 2014 年に至るまでの交通事故発生状況の推移のデータである³⁾。これに対しては飲酒運転の取り締まり強化やシートベルトの装着義務化などさまざまな施策が行われたが，自動車側では衝突安全ボディの採用，エアバッグシステムや ABS(Anti-lock Brake System)など安全システムの標準装備化が進んだ。このようなさまざまな取り組みの結果，交通事故死者数は徐々に減少して現在 4000 人以下のレベルに至っている。エアバッグシステムや ABS などの安全システムにおいても電子技術，その中でもキーデバイスとなる加速度センサや車輪速センサなどの自動車用センサは重要な機能を果たしている。

交通事故のさらなる低減に向けては 1991 年度から国による先進安全自動車 ASV (Advanced Safety Vehicle) のプロジェクトがスタートし，自動車メーカ各社による安全シス

テム実現のためのさまざまな取り組みが行われてきた。ASVプロジェクトは表2に示すように各期が5年となっていて、ここからACC(Adaptive Cruise Control)やLKA(Lane Keep-

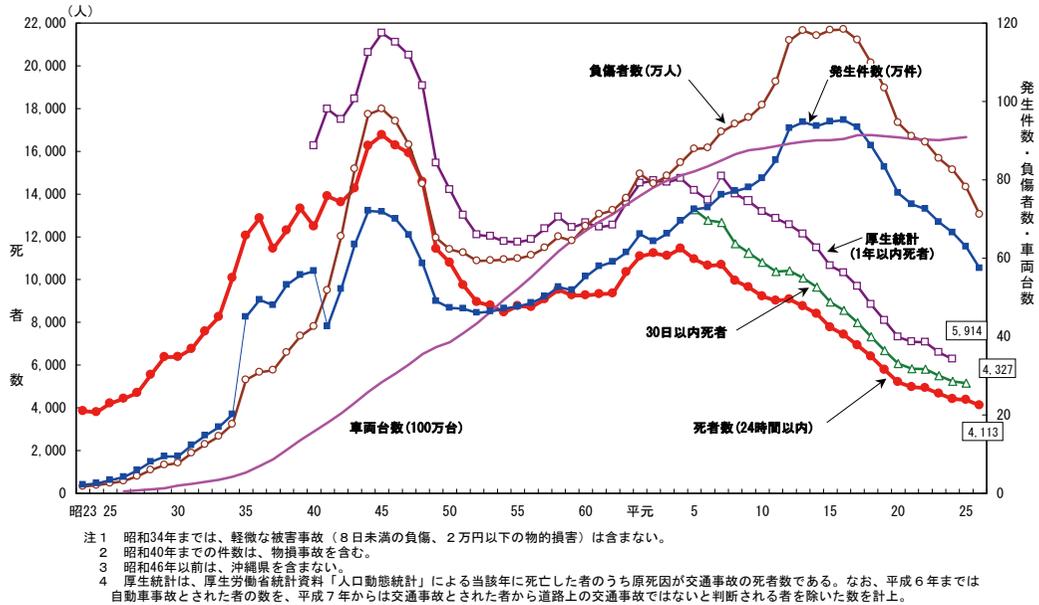


図2 交通事故発生状況の推移(昭和23年～平成26年)³⁾

表2 ASV推進計画の活動経緯と第6期の計画⁴⁾

第1期	第2期	第3期	第4期	第5期	第6期
1991～1995年度	1996～2000年度	2001～2005年度	2006～2010年度	2011～2015年度	2016～2020年度
技術的可能性の検討	実用化のための条件整備	普及促進と新たな技術開発	事故低減への貢献と挑戦	飛躍の高度化の実現	自動運転実現に向けたASVの推進
<ul style="list-style-type: none"> ●開発目標の設定 ●事故削減効果の検証 ★ASV19台によるデモ走行 	<ul style="list-style-type: none"> ●ASV基本理念の策定 ●ASV技術開発の指針等の策定 ●事故削減効果の検証 ★ASV35台によるデモ走行 	<ul style="list-style-type: none"> ●運転支援の考え方の策定 ●ASV普及戦略の策定 ●通信技術を利用した技術開発の促進 ★ASV17台による通信利用型の検証実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●交通事故削減効果の評価手法の検討および評価の実施 ●通信利用型運転支援システムの基本計画書策定 ★ASV30台による通信利用型の公道総合実験 	<ul style="list-style-type: none"> ●ドライバー異常時対応システムの基本計画書策定 ●歩車間通信システムの基本計画書策定 ★ITS世界会議2013東京での通信利用型運転支援システムのデモンストレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ●自動運転を念頭においた先進安全技術のあり方の整理 ●開発・実用化の指針を定めることを念頭においた具体的な技術の検討 ●実現されたASV技術を含む自動運転技術の普及

総 説

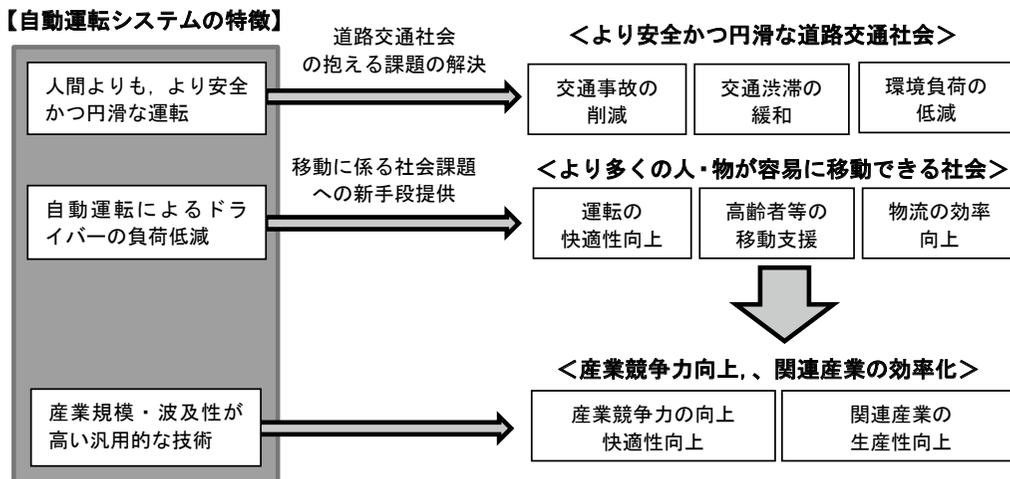


図3 自動運転システムの狙い⁵⁾

ing Assist)などさまざまな先進安全システムが実用化に至っている⁴⁾。近年は将来の自動運転も視野に入れた検討が行われ、図3に示すように安全ばかりではなく、高齢者などの移動支援や物流の効率化による産業競争力の向上など社会的課題の解決への貢献も期待されている⁵⁾。これらの実現には車両状態を検出する従来のセンサに加えて、レーダやカメラなど車両の周囲環境を検出するための外界環境認識センサが必須となっている。以下ではこれらさまざまな自動車用センサの概要と発展の歴史について述べていくこととする。

2 自動車用センサの概要

自動車用センサもシステムによりさまざまな機能・性能が要求され、センサにより「千差万別」ではあるが、その中であえて共通する特徴としては、①小型・軽量、②高信頼性、③低価格を挙げることができると思われる。表3に自動車用センサと産業用、家電用センサの特性仕様の比較を示す。自動車用センサに要求される検出精度は1~5%程度と産業用と家電用センサの中間的位置づけとなるが、極めて厳しい使用温度環境と家電用センサ並みの低価格が要求される。雰囲気温度範囲はエンジンルーム内の最も厳しいところでは-40~150℃にも達し、その中で長期間故障もなく確実に動作させるためには高い信頼性が必要となり、それを低価格

表3 センサ特性仕様の分野別比較

	自動車用	家電用	産業用
精度	1 ~ 5%	5 ~ 20%	0.1 ~ 1%
動作温度	-40 ~ 125℃ (150℃)	-10 ~ 50℃	0 ~ 60℃
振動	2 ~ 25 G	1 ~ 5 G	0 ~ 5 G
価格	¥100 ~ 1,000	¥100 ~ 1,000	¥1,000 ~ 10,000

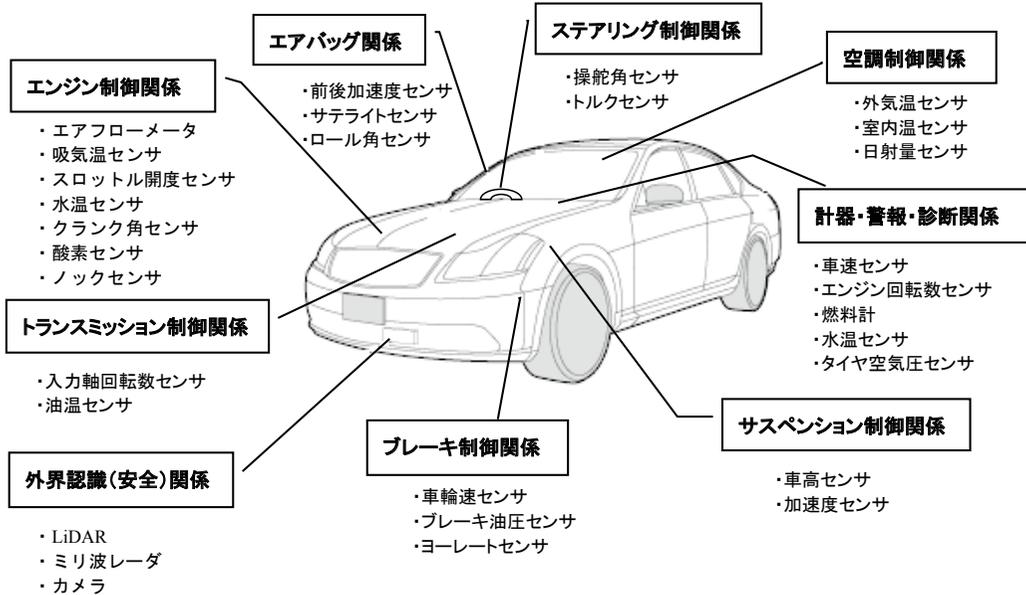


図 4 自動車用制御システムと主要なセンサ

で実現するために専用のデバイス構造や実装技術が開発されてきた。

図 4 に自動車用制御システムの領域とそれに必要な主要なセンサを示す⁶⁾。エンジン制御関係では燃料噴射量・噴射時間制御，空燃比フィードバック制御，点火時期制御，ロック制御などさまざまな機能が要求され，多くのセンサが使用されている。代表的なセンサとしてはエアフローメータ，クランク角センサ，ロックセンサ， O_2 センサなどがある。AT や CVT などのトランスミッション制御関係では入力軸回転数センサや油温センサなどが使用されている。電動パワーステアリングなどのステアリング制御関係では操舵角センサやトルクセンサが，ABS や ESC (Electronic Stability Control) などのブレーキ制御関係では車輪速センサ，油圧センサ，ヨーレートセンサなどが用いられている。

自動車の基本機能である「走る」，「曲がる」，「止まる」以外のシステムとしては空調やワイパーなどボディー制御関係，エアバッグや外界認識など安全関係のシステムがある。空調システムでは温度センサ，日射量センサなどが，オートワイパーでは雨滴センサが用いられている。エアバッグシステムでは現在さまざまな衝突モードに対応するために多数の加速度センサが車体の各所に取り付けられ，専用の LAN (Local Area Network) を用いてメインの ECU (Electronic Control Unit) に接続されていて，車両全体をカバーするようなセンシングシステムとなっている。外界認識関係のシステムとしては ACC，LKA，夜間歩行者警報システムなどがあり，LiDAR (Light Detection and Ranging)，ミリ波レーダ，カメラ，赤外線カメラなどのさまざまな外界認識用イメージセンサが用いられている。

図 5 にカーエレクトロニクスのシステムとそこで用いられる主なセンサの発展のイメージを示す⁷⁾。カーエレクトロニクスは 1970 年代排気ガス規制に対応するためのエンジン制御が

総 説

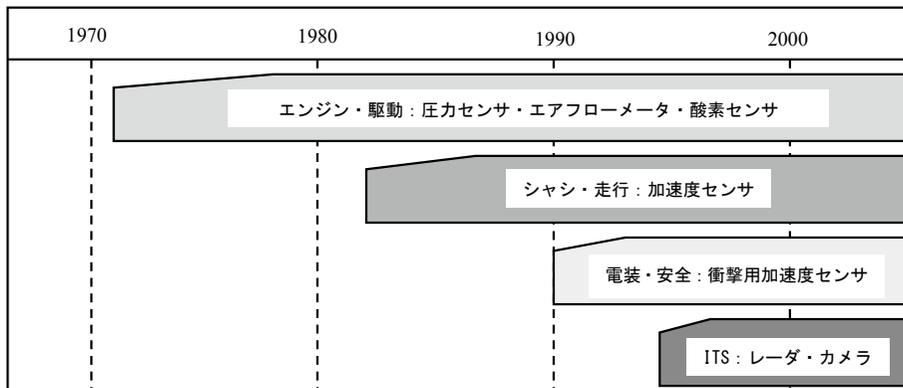


図5 主な自動車用システム/センサ発展の歴史

らスタートしたが、ここでは圧力センサ、エアフローメータ、O₂センサなどが開発され、実用化された。1980年代になると自動車の高級化とあいまって電子制御はステアリングやサスペンションなどのシャシ制御系へと拡大し、操舵角センサや加速度センサなどが用いられるようになった。さらに1990年代以降、安全システムへの要求が高くなり、エアバッグとABSが急速に普及し、衝撃検出用加速度センサや車輪速センサが多く使用されるようになった。最近では外界認識のためのレーダやカメラも小型化・低価格化の技術開発が活発に行われ、製品化が進んでいる。以下では代表的な自動車用センサについての発展・進化の経緯をレビューする。

3 自動車用センサの変遷

1970年代から始まるカーエレクトロニクスの初期の段階では電子技術もまだ未成熟であり、センサについては機械式のものが多く用いられていた。図6にクラッシュゾーンに取り付けるようなエアバッグ用機械式加速度センサの概略図を示す⁸⁾。シリンダー内に納められたボールがマスになっていて、これに衝突の加速度が加わり、磁石の引力に打ち勝って所定距離だけ

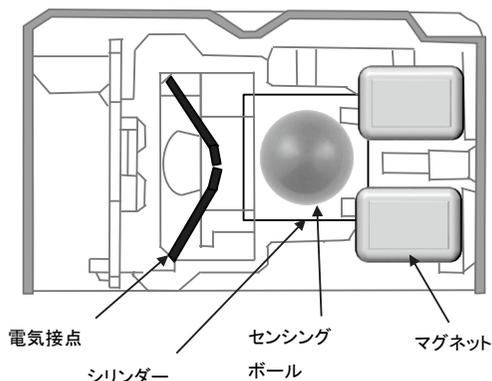


図6 エアバッグ用機械式加速度センサの概略図

変位すると電気接点が閉じる構成となっている。この時加速度の持続時間が所定値に達しない場合には作動しないような機能が実現されている。これら機械式加速度センサでは部品点数が多く、小型化・低価格化が難しいという課題があり、車種に合わせた衝突判定条件の調整も容易ではないことから後述するようなアナログ出力の MEMS 加速度センサへと置き換えられていった。

機械式センサの 2 番目の例として図 7 に可動ベーン式エアフローメータの概略図を示す。空気流により生じる圧力でフラップが変位し、その時の軸の回転角度をポテンシオメータで読み出すような構成となっている。このタイプのエアフローメータは広く普及したが、精度・応答性などの性能や信頼性の点で課題も多く、可動部分を有しないカルマン渦式や質量流量が計測可能なホットワイヤなどの熱式へと進展していった。さらに図 8 に示すような逆流検知が可能な MEMS 熱式エアフローメータも多く用いられるようになった⁹⁾。シリコン基板を裏面からアルカリ液で異方性エッチングして形成された極薄の絶縁膜ダイアフラム上には白金薄膜のヒータ抵抗とその両側に 2 本の温度センサ抵抗が形成されている。ヒータ抵抗に電流を流すとその発熱が空気を介して左右の温度センサ抵抗に伝わり、それらの温度が上昇する。それらの温度差を計測することにより、流量だけではなく流れの方向も検出することができる¹⁰⁾。

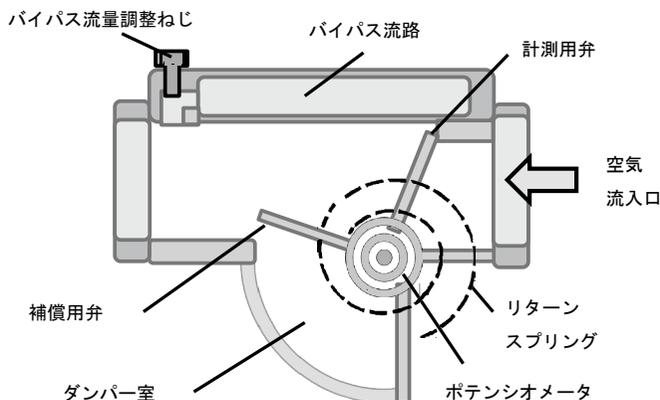


図 7 可動ベーン式エアフローメータの概略図

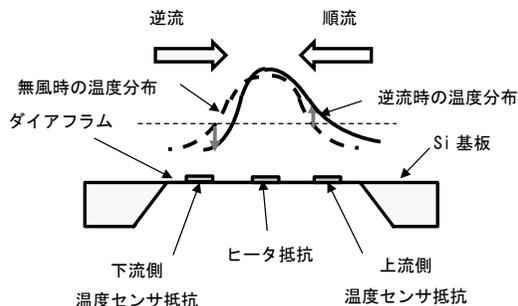


図 8 MEMS エアフローメータの概略図⁹⁾

総 説

一方、クランク角センサや車輪速センサなどの回転センサは仕様環境が厳しいことから、機械式ではないが、従来図9に示すような単純構造のコイル式電磁ピックアップが多く用いられてきた。回転軸に取り付けられた鉄製歯車に対向させて、この電磁ピックアップを設置すると歯が鉄心に近づくと磁石からの磁束 Φ が集中するので磁束 Φ の時間的変化を電磁誘導によりコイルで起電力に変換することで回転を検出することができる。ただし、出力が磁束 Φ の変化率 $d\Phi/dt$ に比例することから、出力電圧が回転数により変動する、低速回転の検出が難しいなどの課題があった。このような点から近年は図10に示すようなホール素子やMR (Magneto Resistive) 素子など出力が回転数に依存しない半導体式磁気センサが用いられるようになった。図11に強磁性のNiFe薄膜のMR素子をバイポーラIC上に集積した磁気センサICのチップ写真と断面図を示す¹¹⁾。信号処理と一体化することで小型化や新しい機能の実現が可能となる。

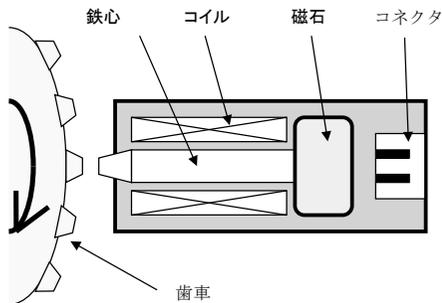


図9 電磁ピックアップ式回転センサの概略図

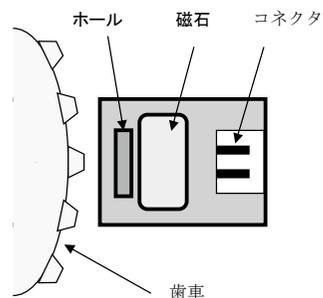


図10 ホールIC式回転センサの概略図

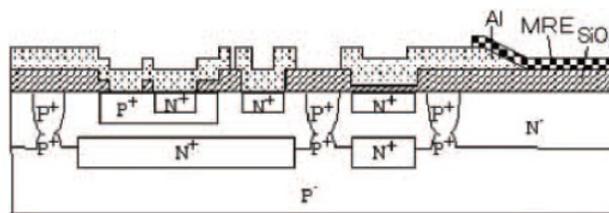
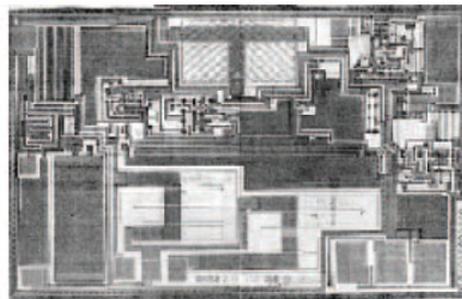


図11 磁気センサICのチップ写真と断面図¹¹⁾

4 MEMS センサ

センサは MEMS 技術を用いることで小型化・低価格化が図られてきたが、MEMS センサは当初はシリコン基板をエッチング加工するバルクマイクロマシニングの技術が主に用いられていた¹²⁾。MEMS センサが本格的に実用化されたのは自動車のエアバッグ用加速度センサからであり、**図 12** にバルクマイクロマシニングにより作製されたオイルダンピング式の piezo 抵抗型加速度センサの例を示す¹³⁾。**図 12(a)** のチップ写真に示すように細長い慣性質量の接続部付近が薄い片持ち梁になっている。その表面に piezo 抵抗が形成され、周囲のフレーム上には信号処理回路が形成されている。このようなセンサ・チップが HIC 基板上にマウントされ、それが **図 12(b)** に示すような TO-3 系カン・パッケージにオイル封入して実装されている。**図 13** はエアダンピング式の piezo 抵抗型加速度センサの例で慣性質量が電気化学エッチング

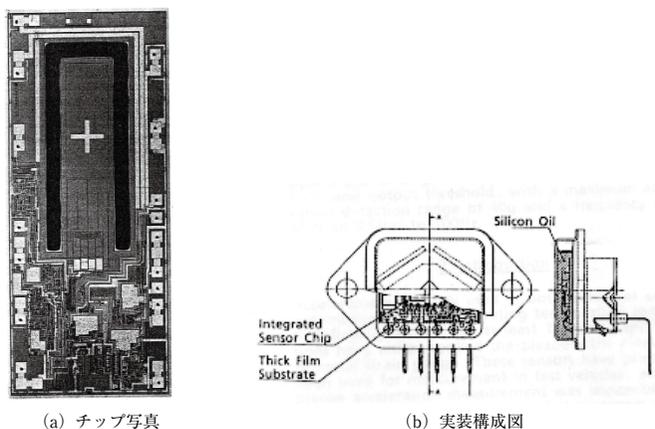


図 12 オイルダンピング式の piezo 抵抗型加速度センサ¹³⁾

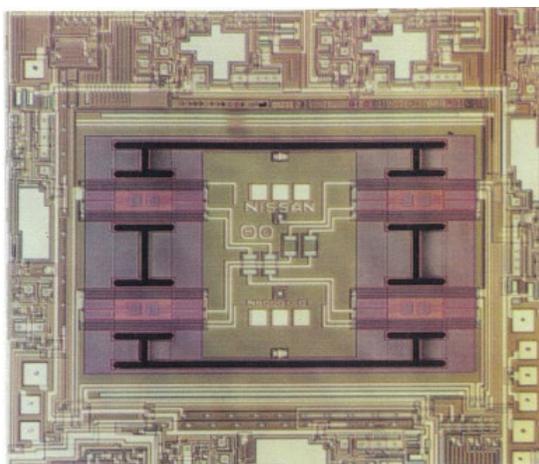


図 13 エアダンピング式の piezo 抵抗型加速度センサのチップ写真¹⁴⁾

総 説

で形成された n 形エピタキシャル層からなるビームで両側から支持された両持ち梁構造となっている¹⁴⁾。周囲のフレーム上には信号処理回路が形成され、センサ・チップはパイレックスガラスの台座基板に陽極接合されてカン・パッケージに実装されている。

バルクマイクロマシニング技術を用いてさまざまな加速度センサが開発されたが、裏面加工の必要性や実装の複雑性など課題も多く、半導体製造技術との整合性がより高く、実装が容易な表面マイクロマシニングへと移行していった。表面マイクロマシニングでは最初に PSG (Phospho Silicate Glass) の犠牲層を基板上に形成して、その上に多結晶シリコン層を形成する。犠牲層をエッチング除去することで多結晶シリコンの構造体をリリースすることができる。図 14 は表面マイクロマシニングにより製造された静電容量式加速度センサの素子断面図で CMOS 回路を形成したシリコン基板上に数 μm 厚の多結晶シリコン膜から成る構造体が可動状態で形成されている¹⁵⁾。多結晶シリコン膜により可動電極となる櫛歯構造を有した慣性質

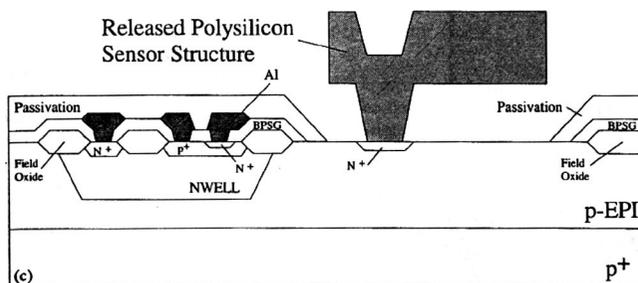
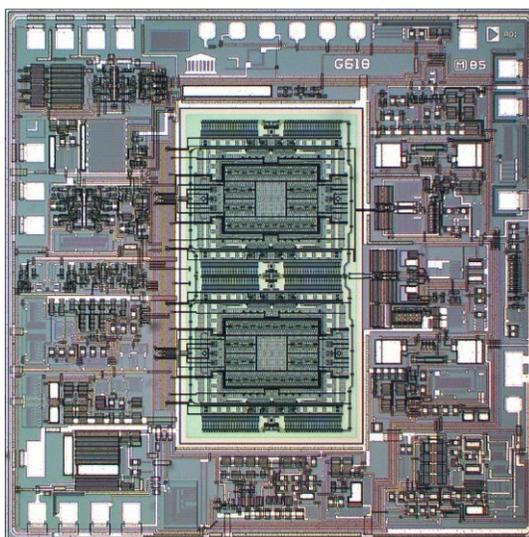


図 14 表面マイクロマシニングによる静電容量式加速度センサの素子断面図¹⁵⁾



写真提供：アナログデバイセス社

図 15 表面マイクロマシニングによる振動ジャイロ ADXRS62x のチップ写真

量を両側からビームで支持した構造体を形成し、この櫛歯電極と対向する形で基板上に形成された櫛歯構造の固定電極と間で差動の可変容量を実現している。シリコン基板面内でビームと垂直方向の加速度印加により生じる慣性質量の変位はこの差動可変容量の容量値の変化となり、信号処理回路により電圧信号へと変換される。図 15 はこのプロセスを用いて製造された振動ジャイロの製品のチップ写真である。櫛歯構造を利用した変位検出機構に加えて、共振子を励振するための別の櫛歯構造を用いた静電式アクチュエータも実現している。共振子はチップ中央に 2 つあり、角速度印加によるコリオリ力によるものではない加速度印加による出力変位は打ち消すような構成となっている。このような表面マイクロマシニングによるデバイスは慣性質量が小さく高感度化が難しい、リリース時あるいは動作時に可動部がスティッキングする可能性があるというような課題もあったが、信号処理回路の工夫あるいは膜の応力緩和、表面処理の改善¹⁶⁾など表面技術の進歩もあり、実用化されるに至った。

5 環境認識用センサ

従来の自動車用センサは、上述したような車両状態を検出するためのセンサが主であったが、近年は運転支援や自動ブレーキのような安全システム用として車両の外部環境を検知するセンサも多く実用化されるようになってきた。車両外部の環境を認識するための LiDAR やカメラ(イメージセンサ)などのセンサをここでは ITS(Intelligent Transport Systems)用センサと呼ぶこととする。ITS 用センサを用いたシステムとしては走行支援のための ACC や LKA に加えて、最近では安全システムである衝突被害低減システムがあり、さらに将来の自動運転への適用も検討されている。主要な ITS 用センサでは外部環境情報を 1 次元もしくは 2 次元の検出素子アレイで取り込み、それらのデータを画像処理することで障害物や走路の認識を行っている。画像処理には高速演算が要求され、専用の ASIC(Application Specific Integrated Circuit)や GPU(Graphics Processing Unit)が用いられている。また ITS 用センサは外部環境情報を得るために外界にさらす形で車体の表面に取り付ける必要があり、デザイン上や信頼性上の課題をクリアしていく必要がある。以下では代表的な ITS 用センサについて解説する。

5.1 LiDAR

LiDAR は検出方向に存在する物体までの距離と方位を検出する装置で通常近赤外線の高エネルギーレーザーを用い、物体にレーザーのパルス光を照射して反射光が戻ってくるまでの時間を計測して距離を求める ToF(Time of Flight)方式が用いられている。検出する物体の方位を求めするためにレーザー光をスキャナでスキャンし、計測を繰り返すことで反射光強度の方位分布を得ることができ、これにより画像処理を用いて検出物体のある程度の形状や大きさを求め、物体の識別を行うことができる。スキャナとしては電磁アクチュエータでミラーを駆動する 1 次元スキャナのほか、ポリゴンミラーをモータで回転させる 2 次元スキャニングも用いられている。

総 説

5.2 ミリ波レーダ

ミリ波レーダでは波長が 1 cm 以下の電磁波であるミリ波を検出方向の物体に照射し、その反射波を検出することで物体までの距離と方位を求める。さらに反射波の位相を使ってドップラー効果をもとに検出する物体との相対速度も求めることができる。距離検出方式にはモノパルス方式に加えて、FM-CW(Frequency Modulated-Continuous Wave)方式や2周波CW方式などがあり、搬送周波数としては76~77 GHzが主に使用されている。FM-CW方式では搬送周波数を三角波により周波数変調し、反射信号とのビート信号をもとに物体までの距離と相対速度を同時に求める。ミリ波のスキヤニングは機械式スキヤニングからアンテナアレイを用いた電子式スキヤニングへと移行し、小型化が進んでいる。またミリ波用高周波回路もGaAsやSiGeを用いたMMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)から微細CMOS回路へと移行し、低価格も進んでいる。ミリ波レーダはLiDARと比較するとビーム幅が太い分、検出分解能は低くなるが、検出の最大距離が長く、雪や霧などの悪天候の影響を受けにくいという長所がある。

5.3 カメラ

カメラは悪天候や逆光に弱く、測距精度もレーダには及ばないが、画素数が極めて多いことから画像認識技術と組み合わせることにより検出物体の詳細な形状把握と物体認識をすることができる。また2個のカメラを用いたステレオビジョンとすることで視差により物体までの距離を計算することもできる。可視光のカメラは通常車室内のルームミラー付近に前方に向けて取り付けられ、白線などの走路情報と障害物情報を同時に得ることができる。ITSのシステムによっては認識の信頼性を上げるためにカメラとレーザーレーダもしくはミリ波レーダの情報を融合させるセンサフュージョンの技術が用いられている。

6 自動車用センサの今後の動向

以上、自動車用センサの概要とこれまでの開発の方向について述べてきたが、今後の動向としては以下のようなことが考えられる。1番目としてはセンサのネットワーク化が挙げられる。エアバッグシステムでは、車両内に配置された多くのセンサやインフレータを統合して制御する必要からすでに専用のネットワークが用いられているが、今後はIoT(Internet of Things)の流れの中で多くのセンサが通信機能を有し、ゲートウェイを通してデータを送ることで多くのシステムが結合され、データの共有化、総合制御の方向へとさらに進んでいくものと思われる。

2番目の動向としては機能の集積化が挙げられる。現在も検出素子と信号処理回路を1チップ化した集積化センサは多く用いられているが、今後はさらに半導体技術の進歩と相まって、異種センサの複合化、EEPROM内蔵による感度/オフセットの電子トリミング化、検出素子のアレイ化による分解能向上など小型化、高性能化が進むものと思われる。センサ・チップの実装についてはLSIと同様に完全に1チップ化するSoC(System on Chip)とSiP(System in Package)への2分化が考えられる。

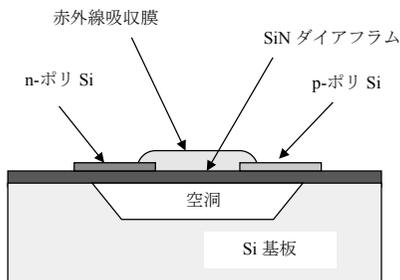


図 16 サーマピル式赤外線センサの画素構造¹⁷⁾

3 番目としては自動運転を目指した外界認識用センサの発展が挙げられる。現在、LiDAR やミリ波レーダ、カメラなどの ITS 用センサが実用化されているが、まだ寸法が大きく高価格のものが多くのように思われ、今後より小型化・低価格化が望まれている。MEMS 技術や新規材料を用いることでさらに一層の小型・低価格化が達成され、広く普及していくものと思われる。MEMS 技術の代表的な適用例としては熱式赤外線イメージセンサがあり、2次元アレイの各画素において赤外線の受光領域をシリコン基板から熱分離する構造体を形成するのに MEMS 技術が用いられている。図 16 はサーモピル型赤外線センサの画素構造であり¹⁷⁾、赤外線吸収膜から成る受光部はその下側がエッチングされて空洞になっていて熱伝導率の低い絶縁膜により周辺で基板に支持されている。絶縁膜上には p 形多結晶シリコン抵抗と n 形多結晶シリコン抵抗の複数の対から成るサーモピルが形成されていて、受光部に照射された赤外線により生じるわずかな温度上昇を電圧信号に変換するような構成となっている。また LiDAR では小型化のためにレーザ光の 2 次元走査に MEMS 技術を利用したマイクロスキャナを用いる検討も行われている¹⁸⁾。

さらに異種センサの統合によるセンサ・フュージョンや AI 技術を用いた認識・識別能力向上により一層の高性能化が進むことが期待される。

文 献

- 1) 自動車検査登録情報協会 HP：「自動車保有台数の推移」。
- 2) 交通安全環境研究所 HP：平成 25 年度講演会資料「わが国の大気環境の現状と自動車排出ガス対策」。
- 3) 警察庁 HP：「平成 26 年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について」。
- 4) 国土交通省 HP：「ASV 推進計画の活動経緯と第 6 期の計画」。
- 5) 首相官邸 HP：「官民 ITS 構想・ロードマップ 2018」。
- 6) 日経 Automotive Technology 編集：車載センサの基礎 2010, 10, 日経 BP 社 (2009)。
- 7) 室英夫：平成 19 年電気学会全国大会論文集, 3, S-22 (2007)。
- 8) H. Muro : *Advances in Science and Technology*, 81, 1 (2013)。
- 9) M. Nagata et al. : *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*,

総 説

447-450(1995).

- 10) 石川人志ほか：電気学会論文誌 E, **126**(8), 381(2006).
- 11) 鈴木康利：デンソーテクニカルレビュー, **9**(2), 10(2004).
- 12) 室英夫：電気学会論文誌 E, **134**(7), 169(2014).
- 13) M. Mutoh et al. : 1990 *IEEE WORKSHOP on Electronic Applications in Transportation*, 35 (1990).
- 14) H. Muro et al. : 電気学会論文誌 E, **117**(2), 75(1997).
- 15) W. Kuehnel and S. Sherman : *Sensors and Actuators A*, **45**, 7(1994).
- 16) Y. Yee et al. : *Sensors and Actuators A*, **52**, 145(1996).
- 17) 室英夫ほか：マイクロセンサ工学, 71, 技術評論社(2009).
- 18) H.Muro et al. : *IEEJ TRANS. Sensors and Micromachines*, **127**(1), 31(2007).

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください
<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>
ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムの SkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：
<https://www.skycom.jp/free/>



索引

英数・記号

1 次遅れ	154
1 次系	151
2 周波 CW	14
3D 超音波センサ	127
ABS	4
ACC	5, 231
ACSF	225
AdaBoost	35
ADAS	57
ADASS	225
ADAS 用途の画像認識 SoC	159
AD 変換	190
AEBS	227, 234
ALKS	227
AP : Average Precision	111
ARMA	135
ASV	4
BF スコア (Boundary F1 score)	53
BIST	172
CEATEC	139
CMOS	12
CNN : Convolutional Neural Network	35, 44, 105
CoHOG 特徴量	165
complex demodulation	146
DARS	235
DCLS	172
DCNN アクセラレータ	164, 167
Dip & Waves	144
DNN による認識	164
DPM	34
ECC	172
ECU : Electric Control Unit	7, 79
EM	234
Enhanced CoHOG 特徴量	165
ESC	7
EuroNCAP	58

Factorization	122
Faster R-CNN	39
FFT 処理	193
FM-CW	14
FP16	169
FRAV	228
F 値 : F-measure	47
GoogLeNet	37
GPU	111
GRRF	225
GRVA : Working Party on Automated/ Autonomous and Connected Vehicles	225
Hausdorff 距離	53
HD 品質	187
High frequency component	149
HOG	34
HoG 特徴量	165
HOX アクセラレータ	164
ICF	35
IEC	220
IFFT 処理	193
ILSVRC	35
Intensity-NDT : I-NDT	72
IoU : Intersection over Union	53, 110
ITS	13
Kalman	
ゲインと駆動雑音共分散行列の関係	97
ゲインと設計パラメータの関係	97
ゲインと追尾誤差の関係	97
フィルタ	92
フィルタに基づくセンサ融合法	103
LCDAS	59
LiDAR : Light Detection And Ranging	7, 33, 65, 140
LKA	5
Low frequency component	146
LPDDR4	162
LSTM : Long Short Term Memory	44
Lucas-Kanade 法	121

MAC 演算器	169
MEMS : Micro Electro Mechanical Systems	
.....	4, 65
MEMS ミラー型 LiDAR	65
Minimum-Variance Filter (MV フィルタ) 規範	
.....	100
MMIC	14
Monocular depth estimation	113
MR (Magneto Resistive) 素子	10
MRM	229
MUSIC : Multiple Signal Classification	44
NCC : Normalized Cross Correlation	123
Normal Distributions Transform (NDT)	65
Normal Distributions 地図 (ND 地図)	70
Object detection	105
ODD	229
OEDR	229, 237
Over the Air	177
PSG	12
R-CNN	39
RANSAC : RANdom SAmple Consensus	
アルゴリズム	85
RCTA	59
RNN : Recursive Neural Network	44
ROI	164
Root Mean Square Error (RMSE)	75
Root-Mean-Square Index (RMS-index) 規範	
.....	100
RPN	39
SAD : Sum of Absolute Difference	123
SegNet	54
Selective Search	38
Semantic segmentation	105
SfM	122
Shape from Motion	122
SiP	14
SLAM	140
SoC	14
SSD : Sum of Squared Difference	37, 123
Structure from Motion	122
SVM : Support Vector Machine	34, 43
T.C.R.	208
ToF	13
TTC	233
Tukey 法	156
U-net	54

UN-R79	225
V2X	176
統合アンテナ ECU	177
Visconti	159
VMAD	227
YOLO	37

あ行

アイトラッカー	153
アクセラレータ	159
アクセル入力	236
圧縮重みデータ伸張機能	169
アップサンプリング	120
厚膜抵抗器	215
アベレージプーリング	37
アンカー	39
位置・速度観測 Kalman フィルタにおける 追従性能	99
位置と加速度を観測値とする追尾フィルタ	
.....	95
移動補正	68
ウィーン道路交通条約	225
運転	
移行要求	231
技量	237
支援システム	225
支援装置	105
者即応性認識システム	235
免許制度	227
エアダンピング	11
エアバッグシステム	4
エアフローメータ	9
エコー波形	87
エコー幅	87
エピソード線	123
エンコーダ	106
エンジン制御	7
オイルダンピング	11
横断歩行者	234
オームの法則	207
オプティカルフロー	38, 120
オペレータモデル	151
重み付き平均	72
音声合成	137

か行

階層型ニューラルネットワーク	119
顔角度推定	200
学習済パラメータ	168
学習データ	108
学習率	109
拡張カルマンフィルタ	23
確率的勾配降下法	119
画像認識	105, 119
加速度センサ	8, 101
活性化関数	37, 106
滑動性眼球運動	154
カメラ	33
眼球運動	152
監視領域	117
観測行列	94
観測誤差分散	94
機械学習	34, 84
気象メッシュデータ	185
軌道計画 (Trajectory plan)	178
輝度の変化方向	165
機能安全要求対応	171
機能要件	228
共分散行列	70
局所解	74
鋸歯状波	216
距離	82
距離・速度・加速度センサ融合	94
距離推定	106
緊急	
制動	234
操作	234
操舵	234
近赤外線センサ	187
櫛歯構造	13
駆動雑音	93
クランク角センサ	10
グリッドマップ	45
クロスエントロピ	109
クロス引き出し	214
検出精度	6
減便	132
交差検証	47
高信頼性	6
交通	

環境状況	237
規則	232
参加者	105
参加者の認識	19
事故	4
勾配法	121
高分子容量式	195
国連自動車基準調和世界フォーラム (WP.29)	225
誤検出	86
誤差逆伝播法	44, 119
誤差伝播の法則	25

さ行

サーマルマネジメント	219
サーモバイル	15
再現率 (Recall)	47
最小二乗法	85
最小リスク操作	229, 235
最適化アルゴリズム	37
最適化計算	72
最適な定常 Kalman ゲイン	100
サイバーセキュリティ	225
鎖交	217
雑音抑圧性能	99
サックード	152
情報	202
三角測量 (法)	82, 121
残差	151
閾値	136
自己位置推定	65
試行回数	86
システムオーバーライド	236
視線移動モデル	152
視線検出装置	199
実効的なインダクタンス	218
実装ばらつき	213
実装ピッチ	213
湿度センサ素子	195
時定数	151
自動	
運転	105, 128, 223
運転システム	230
運転認証	227
運転フレームワークドキュメント	228

車運転技術評価システム S.D.A.P. …… 204
 車運転評価システム …… 199
車線維持システム …… 227
 操舵 …… 225
駐車システム …… 79
 プレーキ …… 227
 弱識別器 …… 35
 車載 …… 132
 アーキテクチャ …… 175
 カメラ …… 187
 車線維持機能 …… 231
 車線逸脱防止装置 …… 225
 車両 …… 108
 構造法 …… 227
 通信技術 …… 231
 車輪速センサ …… 10
シャント抵抗器 …… 207
 周囲温湿度センサ …… 186
 周辺確認能力 …… 237
 縦列駐車 …… 80
 縦列駐車空間 …… 80
 主課題 …… 152
 縮流 …… 210
 準静電界センサ …… 186, 187
 使用温度環境 …… 6
 障害物検知 …… 118
使用環境温度 …… 221
 消失点 …… 120
 衝突耐性 …… 231
 衝突防止 …… 127
 自律航法 …… 79
 人工知能 …… 119
深層学習 …… 34, 43, 105, 119
心拍変動 …… 143
 垂直解像度 …… 66
ステレオカメラ …… 108, 122
 ステレオビジョン …… 14
 スノータイヤ …… 185
 正解率(Accuracy) …… 47
 正規化 …… 120
正規化画像座標 …… 24
 正規分布 …… 70
 制御装置 …… 131
 静電式アクチュエータ …… 13
 精度 …… 53
 赤外線

温度センサ …… 186
 サーモグラフ …… 220
 センサ …… 15
 セグメンテーション …… 167
 設計パラメータの最適設計方法論 …… 96
 センサ
 データのフュージョン処理 …… 175
 フュージョン …… 14
 融合 …… 91
 全畳み込みネットワーク …… 202
セントラルコンピューティング化 …… 175
 前方検知 …… 237
 専有グリッドマップ …… 50
 層 …… 37
 走行
 可能領域 …… 105
 環境 …… 237
環境設計条件 …… 229
 環境リスクや周辺移動体などの行動・
 軌道予測 …… 178
双方向 LSTM (bidirectional LSTM) …… 46
 ゾーン ECU …… 176
 測位 …… 92
 速度観測値を融合した追尾法 …… 94
 ソフトウェアアップデート …… 227
 損失関数 …… 37, 109

た行

大気汚染 …… 4
 対象物・事象検知 …… 229
 耐用期間 …… 232
 ダウンサンプリング …… 70
 多結晶シリコン …… 12
 たたみ込み …… 120
 畳み込み層 …… 36
 畳み込みニューラルネットワーク …… 105
 単眼カメラを用いた距離推定 …… 20
 単眼深度推定 …… 113
端子部温度 …… 219
**単体ドメインをまとめて機能制御するクロスド
 メイン型** …… 179
 チップ抵抗器 …… 220
 着座 …… 134
注意資源 …… 153
 駐車

空間	79
支援装置	225
方法の認識	83
超音波	127
距離センサ	91
式自動駐車システム	79
センサ	79
センシング	79
の反射波	127
超解像アルゴリズム	44
長尺物体種別の認識	87
追従性能	98
追跡法	121
追尾	
誤差	102
の不安定性	103
フィルタ	92
フィルタの最適設計	96
通電パターン	208
低 T.C.R.	212
ディープビリーフネットワーク	36
抵抗温度係数	208
定常ゲイン	98, 152
停留	152
データ記録装置	228
データセット	108
データ統合	68
適合率(Precision)	47
デコーダ	106
電圧検出端子	208
電位分布	210
電位変動	210
電気化学エッチング	11
電子制御システム	227
電場解析	215
電波レーダ	33
伝搬経路	87
テンプレートマッチング	123, 200
電流経路	208
電流センシング	207
等加速度モデル	93
統合システムアーキテクト	182
等速モデル	93
動的運転タスク	229
道路	109
交通規則	230

利用者	233
特徴マップ	106
特徴量	84
特徴量ベースによる認識	164
ドップラーセンサ	101
ドライバー	
モニター	235
モニタリング	229
ドライバ状態(検出)	151
ドライバモデル	151
ドライビングシミュレータ	153
トランスミッション制御	7
トロック問題	124

な行

ニューラルネットワーク	36
二輪車	108
認識精度	110
熱源分散	222
ネットワークパラメータ	37
眠気	151

は行

ハードウェア実装の ISP	163
バイアス誤差	99
排気ガス	4
ハイサイド	216
廃線	132
パイプライン構造	163
バウンディングボックス	105
白線	109
バスバー	207
白金測温抵抗体	195
バックプロパゲーション	36
バルクマイクロマシニング	11
パワースペクトル密度	155
反射強度	65
反射点	82
ヒストグラム	83
非線形活性化	120
非線形カメラモデル	23
ヒューベル・ウィーセル仮説	36
ヒューマンマシンインターフェース(HMI)	
	229

評価関数	71
標準偏差	88
表情判定法	143
表面	
実装用	215
実装用角形固定抵抗器	220
ホットスポット	220
マイクロマシニング	12
ビルドイン加速度計	187
ブーリング(層)	36, 120
負荷軽減曲線	219
副次課題	152
不合理な安全リスク	230
物体検出問題	105
部分空間同定法	154
部分的自動駐車システム	79
不偏共分散行列	72
不要反射点	85
フリーマンのチェイン符号	83
ブレーキ制御	7
ブレーキ入力	236
ブロックマッチング法	121
分散	84
分流	207
平滑性能	98
平均ベクトル	70
平行引き出し	213
並列	
演算	166
実装	212, 221
駐車	80
駐車空間	80
方位角度	82, 83
方向指数	83
法線ベクトル	83
ホール素子	10
ボクセル	70
歩行者	108
追尾	101
ホットワイヤ	9
補てん	132

ポテンシオメータ	9
歩道	109
ホルター心電計	143

ま行

マイクロスキャナ	15
マックスプーリング	37
マルチタスク学習	110
マルチタスクモデル	106
ミリ波レーダ	7
メタルグレース抵抗器	215
目標追尾技術	91
漏れ電流	160

や行

誘導性	215
陽極接合	12
要素分解	122
予測誤差	101

ら行

ラインバッファメモリ	163
ラスタースキャン	66
力学センサ	186
領域分割	105
理論性能解析	96
レベル2や2+	175
レベル3と4	175
労務規定	131
ローカルメモリ	169
ローサイド	216
路上試験	230
路線	131
路側帯サーバ	186

わ行

割り込み車両	233
--------	-----

自動運転のための 高精度センシング技術

環境認識、運転者検知と画像認識 AI プロセッサの実際

発行日 2020年11月30日 初版第一刷発行
監修者 室 英夫
発行者 吉田 隆
発行所 株式会社 エヌ・ティー・エス
東京都千代田区北の丸公園 2-1 科学技術館 2階 〒102-0091
TEL : 03(5224)5430 <http://www.nts-book.co.jp/>
制作・印刷 株式会社 双文社印刷

ISBN978-4-86043-694-0 C3065

© 2020 室英夫, 倉元昭季, 伊東敏夫, 秋田時彦, 三田誠一, 青柳靖, 加藤正浩, 辻田亘, 山下元気, 佐保賢志, 原英之, 前田賢一, 高橋敦郎, Andreas Just, 大澤定夫, 吉田豊, 早野順一郎, 得竹浩, 寺西翔一朗, 佐野徹, 藤本雄一郎, 柴田義孝, 櫻庭彬, 田村宏樹, 櫻井啓子, 島内匠, 平沢浩一, 塩見幸広.

乱丁・落丁はお取り替えいたします。無断複写・転載を禁じます。

定価はケースに表示してあります。

本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は、当社ホームページにて掲載いたします。

※ホームページを閲覧する環境のない方は当社営業部(03-5224-5430)へお問い合わせ下さい。



関連図書

	書籍名	発刊日	体裁	本体価格
1	量子センシングハンドブック ～量子科学が切り拓く新たな領域～	2020年	B5 230頁	40,000円
2	空飛ぶクルマ ～空のモビリティ革命に向けた開発最前線～	2020年	B5 332頁	48,000円
3	ポリマーの強靱化技術最前線 ～破壊機構、分子結合制御、しなやかタフポリマーの開発～	2020年	B5 318頁	45,000円
4	ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線 ～二次元ナノシートの物性評価、構造解析、合成、成膜プロセス技術、応用展開～	2020年	B5 448頁	54,000円
5	グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用 ～世界の動向、CVD合成、転写積層、量子物性、センサー・デバイス、THz応用～	2020年	B5 558頁	54,000円
6	2020版 薄膜作製応用ハンドブック	2020年	B5 1570頁	69,000円
7	リモートセンシングの応用・解析技術 ～農林水産・環境・防災から建築・土木、高精度マッピングまで～	2019年	B5 506頁	58,000円
8	人と共生する AI 革命 ～活用事例からみる生活・産業・社会の未来展望～	2019年	B5 254頁	32,000円
9	電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電	2019年	B5 492頁	50,000円
10	サーマルデバイス ～新素材・新技术による熱の高度制御と高効率利用～	2019年	B5 448頁	48,000円
11	次世代永久磁石の開発最前線 ～磁性の解明から構造解析、省・脱レアアース磁石、モータ応用まで～	2019年	B5 356頁	45,000円
12	スマート農業 ～自動走行、ロボット技術、ICT・AIの利活用からデータ連携まで～	2019年	B5 444頁	45,000円
13	改訂増補版 プラスチック製品の強度設計とトラブル対策	2018年	B5 329頁	39,000円
14	スマートロジスティクス ～IoTと進化するCM実行系～	2018年	B5 294頁	32,000円
15	オーグメンテッド・ヒューマン ～AIと人体科学の融合による人機一体、究極のIFが創る未来～	2018年	B5 512頁	48,000円
16	自動車のマルチマテリアル戦略 ～材料別戦略から異材接合、成形加工、表面処理技術まで～	2017年	B5 384頁	45,000円
17	人と協働するロボット革命最前線 ～基盤技術から用途、デザイン、利用者心理、IO13482、安全対策まで～	2016年	B5 342頁	42,000円
18	飛躍するドローン ～マルチ回転翼型無人航空機の開発と応用研究、海外動向、リスク対策まで～	2016年	B5 380頁	45,000円
19	高精度化する個人認証技術 ～身体的、行動的認証からシステム開発、事例、国際標準化まで～	2014年	B5 380頁	38,000円
20	自動車オートパイロット開発最前線 ～要素技術開発から社会インフラ整備まで～	2014年	B5 340頁	37,000円
21	次世代ヒューマンインタフェース開発最前線	2013年	B5 668頁	43,800円
22	電気自動車の最新制御技術	2011年	B5 272頁	37,800円

※本体価格には消費税は含まれておりません。