

自動運転の進化を牽引する基盤技術

志磨 健
Shima Takeshi

永崎 健
Nagasaki Takeshi

栗山 哲
Kuriyama Akira

吉村 健太郎
Yoshimura Kentaro

祖父江 恒夫
Sobue Tsuneo

道路交通社会における交通事故防止および高齢化対応の切り札である自動運転に関しては、2020年以降のレベル3以上の実現に向けて各社の技術開発が加速している。そういった中で、日立は自動運転の進化の基盤となる、外界センシング技術、認知・制御技術、AI技術の自動運転

への適用および製品化に注力している。本稿では、ステレオカメラ、画像認識技術、ミリ波レーダ、軌道生成技術、AI技術の自動運転への適用取り組み例、および今後の展望について述べる。

1. はじめに

道路交通において、国内では年間50万件以上の交通事故が発生し、4,000人以上の人命が失われている¹⁾。これを受け、交通事故数を低減する予防安全システムや運転手の機能を代替する自動運転の研究開発が活発に行われている。自動運転を高信頼に実現するための基盤技術は、車両周囲の障害物をリアルタイムに検出する外界センシング技術と、人間に近いスムーズな車両制御を実現する認知・制御技術であり、さらには、これらにAI (Artificial Intelligence) 技術を導入することでより複雑な環境下での自動運転が可能となる。

本稿では、自動運転を支えるこれら基盤技術の日立グループでの取り組みを紹介する。

2. 自動運転の取り組み

予防安全システム向けの外界センシング技術としては、ステレオカメラを2008年に日立オートモティブシステムズ株式会社が製品化し、ステレオカメラのみで自動緊急ブレーキと先行車追従を実現した。また、車両の全周囲を4つの広角カメラで監視して車両周囲の移動物体を検知する技術をクラリオン株式会社が開発するなど、外界センシング技術の開発を推進している。さらには、これら外界センシング技術と認知・制御技術を統合し、2016年2月に「いばらき近未来技術実証推進事業」の一つとして茨城県内の公道において自動運転システムの実験を実施している²⁾。

3. 外界センシング技術

ここでは、外界センシング技術のうち自動車の前方を監視するフロントセンシング技術を紹介する。

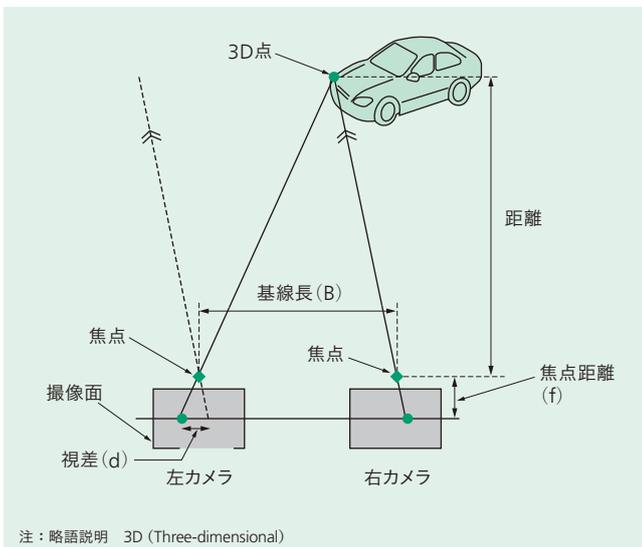
日立では、ステレオカメラをフロントセンシングのベースとして、前方約150 m以上の遠方車両の検知を長距離ミリ波レーダで補完するセンサー構成をコンセプトとしている。ステレオカメラの利点は、人間の目と同じ原理で外界を把握することにより、形状や見かけが任意の立体物でも検知可能で、かつ、三次元情報と画像の濃淡情報が同時に取得でき、高い横方向分解能を持つ点にある。

3.1 ステレオカメラ

ステレオカメラは、左右に配置された2台のカメラを利用し、同じ物体に対する見え方のずれ(視差)から、三角測量の原理で対象物までの距離を計測するセンサーである(図1参照)。この「視差」より求めた車両前方の距離情報を利用し、(1) 障害物となる立体物の検知、(2) 走行可能な路面領域の検知、さらには後述するように視差のみでは検知が難しい(3) 遠方車両の検知処理を行うことで、車両前方の環境を把握する³⁾(図2参照)。

3.1.1 立体物検知

(1) 立体物の検知は、以下の2つのプロセスから成る。まず視差画像(距離画像)の算出処理である。視差画像とは画像の画素各点に視差(対象物までの距離)の情報を持つ画像である。左右カメラの画像の一方を基準画像とし



注：略語説明 3D (Three-dimensional)

図1 | ステレオカメラの計測原理

左右カメラで同じ物体を撮像した点の視差 (d), 左右カメラ間の長さ (基線長) (B), カメラの焦点距離 (f) を用いて, 対象物までの距離を測定する。

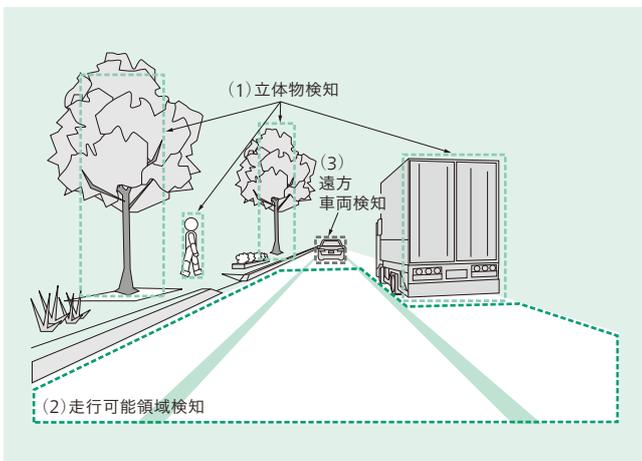


図2 | ステレオカメラによる環境把握

視差より求めた車両前方の距離情報を利用して, (1) 立体物検知, (2) 走行可能領域検知, (3) 遠方車両検知を行い, 環境を把握する。

て, その各点からもう一方の画像において同対象が撮像されている点を探索および抽出することで対象物の視差を求め, 三角測量の原理を用いて視差から距離を一意に求めることができる。

次に, 算出された視差画像 (距離画像) に対して互いに近い距離のデータをグルーピングする処理を行う。左右のカメラで撮像された全領域において距離情報が取得可能であるため, 物体の形状などの仮定を必要とせず, 任意の立体物を検知可能である。

ステレオカメラで撮像した画像に立体物の検知結果と白線の検知結果を重畳した画像を図3に示す。車両制御に用いる対象となる立体物は主に車両や歩行者であるが, 前述のとおり物体形状に対する依存性がないため, 任意立体物を検知してその距離や相対速度から危険と判断された場合は, 自動緊急ブレーキなどの車両制御を行うことが可能である。



図3 | ステレオカメラによる立体物検知

画像上の青い矩 (く) 形が立体物の検知結果, 赤い線が白線の検知結果であり, 車両, 歩行者, および任意の立体物を検出することが可能である。

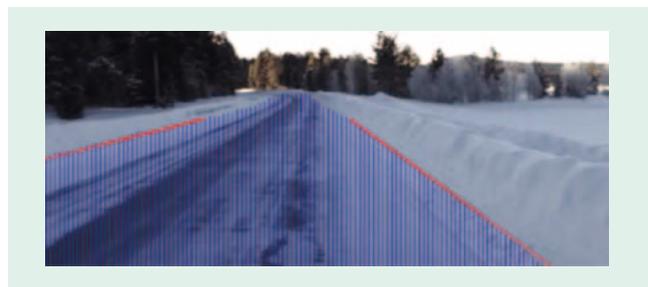


図4 | 積雪した道路での走行可能領域検知

路面や路肩が雪で覆われたシーンでの検知結果を示す。赤い線が道路端, 青い線の領域が走行可能領域を検知した結果である。

3.1.2 走行可能領域検知

次に (2) 走行可能な路面領域の検知について述べる。

本機能では, 3.1.1項で述べたように算出した視差 (対象物までの距離) の情報を解析し, 前方の平坦度合い, 勾配などを算出して, 車両が物理的に走行可能な領域を検出する⁴⁾。その結果, 例えば一面が雪に覆われて道路境界線 (白線) が見えない状況下においても前方の走行可能領域が検出可能となる (図4参照)。

3.1.3 遠方車両検知

ステレオカメラは三角測量の原理で対象物までの距離を算出しているため, 2つのカメラ間距離 (基線長) が短くなると原理的に遠方の距離測定精度が低下する。そのため, 基線長が長いほうが遠方まで検出できるが, 車両への搭載性の面で筐 (きょう) 体の小型化へのニーズが高い。これに対し, 基線長が短い小型ステレオカメラにおいても遠方の検知性能が維持できるように (3) 遠方車両の検知処理を行っている。

本機能は, 視差情報のみでなく, 画像の濃淡情報も用いることで実現する。その一例として, 機械学習により車両のパターンを検出して画像中の車両領域と背景領域を分離

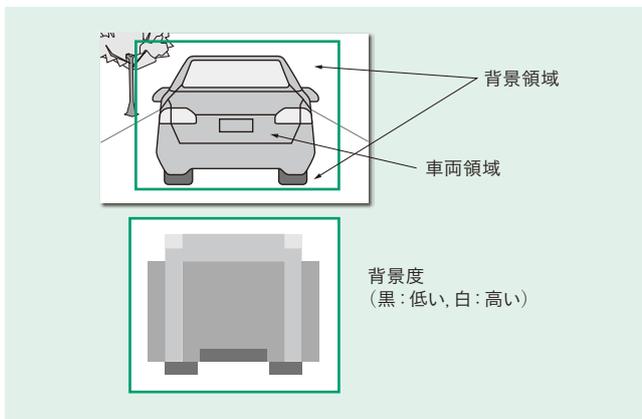


図5 | 画像濃淡情報を用いた遠方車両検知

機械学習により、車両のパターンを検出して車両領域と背景領域を分離することで遠方車両を検知する。



図6 | 小型版ステレオカメラ

小型版においても自動緊急ブレーキと先行車追従機能が動作可能である。

して「背景度」という指標を算出し、この指標と視差情報の相互のフィードバックによって遠方車両の検知性能の向上を図る³⁾(図5参照)。

以上の立体物検知、走行可能領域検知、遠方車両検知の各機能により、日立オートモティブシステムズが開発した小型版ステレオカメラにおいても、自動緊急ブレーキと先行車追従という2つの機能の両立が可能となった(図6参照)。

3.2 ミリ波レーダ

ミリ波レーダは、光学式センサーに比べて分解能が低いものの、逆光や暗所、雨や霧などの車両周辺環境が悪い状況でも性能の劣化が少なく、検知距離が長いことが特徴である。車両周辺センサーとしてのミリ波レーダは、その検知エリアに応じて大きく2種類に分けられる。一方は車両周辺360度の数十メートル程度以内の近距離にある障害物を検知する近距離レーダであり、車線変更時の追い越し車の検知などに用いられる。他方は前方200 m以上の遠距離にある障害物を検知する遠距離レーダであり、車間距離制御などに用いられる。ここでは、遠距離レーダについて述べる。

遠距離レーダは、77 GHzというレーダ以外では用いない高周波を用いるため、レーダの検知距離を左右するアンテナに用いる部材は特殊でコストが高い。したがって、アンテナの低コスト化と高性能化の両立が遠距離レーダ製品化の課題である。

われわれはこの課題を解決するため、特にアンテナ部材コストを決定するアンテナ基板の小型化に着目した。従来のアンテナの形状(シリーズフェッドアンテナ)を図7(a)に示す。樹脂基板表面に所望周波数で共振する複数の導体パターン(パッチ)を形成し、基板の鉛直方向に電波を放射する。例えば77 GHzでビームの半値幅を上下方向5度、左右方向10度とする場合、アンテナサイズはおおよそ19 mm×47 mmとなる。

一方、今回開発したアンテナの構造を同図(b)に示す。従来のアンテナではパッチを複数並列することでアンテナ利得を向上させていたのに対し、ホーンと誘電体レンズを用いてパッチから放射される電波を集光させることでアンテナ利得を向上させた。この構造により、アンテナ基板上に形成が必要なパッチは1個となり、アンテナ基板サイズを大幅に小型化できる。なお、ホーンはレーダの筐体と一体形成可能であり、誘電体レンズはレドームと呼ばれるレーダの蓋と一体形成可能であるため、ホーンとレンズを追加することによるコスト増加を抑制できる。

従来のアンテナと今回開発したアンテナとを試作評価した結果、今回開発したアンテナは従来に比べ1.6倍高いアンテナ効率の実測結果が得られた。なお、アンテナ効率はアンテナ利得をアンテナ開口面積で割った値に比例する。これにより、アンテナ基板サイズを小型化しつつ、レーダの高性能化が可能である見通しを得た。

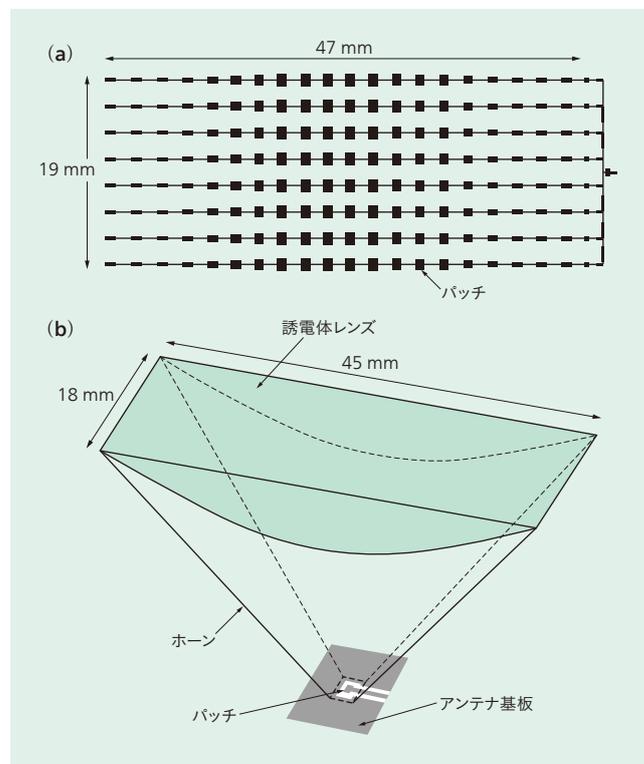


図7 | 従来のアンテナ形状と今回開発したアンテナの構造

従来のアンテナ形状を(a)に、今回開発したアンテナの構造を(b)にそれぞれ示す。

4. 認知・制御技術

日立グループは、駐車場や高速道路における自動運転に加え、一般道での自動運転実現に貢献する技術の先行研究にも取り組んでいる。われわれは、歩行者などの行動変化を予測し、リアルタイムで最適な速度パターンを生成することで、安全かつ実用的な速度で衝突を防止する基本技術を開発し、その有効性を実験車によって確認した。今後、検証を重ねることで技術開発を加速し、自動運転の実用化に貢献する。

一般道では通行車両や歩行者などの移動体やさまざまな障害物を認知し、これらの行動を予測・判断しながら、安全かつ周囲の流れに沿った運転操作をすることが必要であり、高速道路に比べて自動運転実現に向けた課題はより複雑となる。人間が行う高度な認知・判断・操作を含む運転を自動化するためには、移動体や障害物を認知することに加えて、その行動変化予測と、予測に基づいて衝突を防止する運転パターンを計画し、安全かつ実用的な速度で走行することが求められる。

われわれは、これらの課題を解決するための基本技術となる行動変化予測に基づく速度制御技術を開発し、その有効性を実験車で確認した。その特長は以下のとおりである。

ロボットの移動経路を計画する際に用いられるポテン

シャル法に着目し、移動体と障害物との位置関係から移動体の将来行動を予測することで、自車との衝突を防止する基本技術を開発した。具体的には、歩行者が駐車車両などの障害物を避け、リスクポテンシャルの低い空間へ進路変更する行動変化をモデル化した。この技術により、歩行者と自車の衝突が予測される場合は、加速度変化を最小化する最適速度パターンで滑らかに減速し、安全性が保たれる場合は、減速せずに実用的な速度を維持することが可能となる。

今回開発した技術の有効性を確認するため、実験車による検証を行った(図8参照)。歩行者行動予測技術に基づいた制御により、実用的な歩行者通過速度、および良好な乗り心地の基準である加速度(2.2 m/s²以下)、加速度変化(2.0 m/s³以下)を達成した。

5. AIを活用した自動運転の高度化

レベル3の自動運転を実現するためには、複雑な走行環境での自動運転を実現しなければならない。例えば、他車両が走行する高速道本線への合流、他車両や歩行者が行き交う一般道交差点での右左折などである。

近年、自動車の制御システムの開発では、モデルベース開発が増えている。モデルベース開発では、有識者が制御

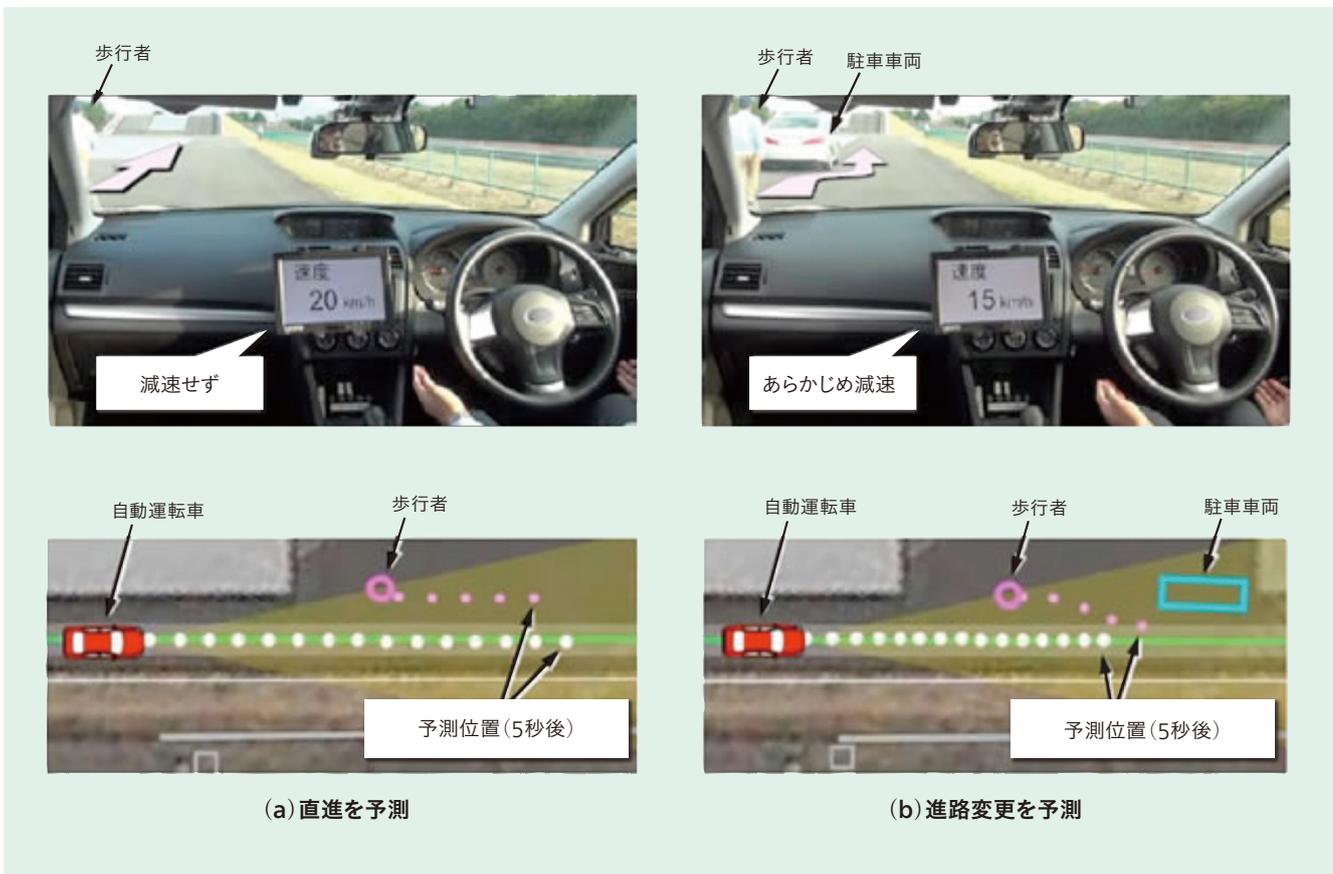


図8 歩行者行動の予測制御

歩行者の進路変更を予測し、あらかじめ減速して通過する(上:実験車,下:予測制御情報)。

モデルを構築し、シミュレーションによる検証を繰り返してから実車評価を行う。複雑な走行環境下、例えば高速合流の場合、前方の合流車両の挙動、本線走行中の車両の速度や車間距離、加速車線の残距離などのさまざまな要因が絡み合うため、制御モデルの構築・評価には非常に時間を要する。

われわれは、制御モデルの構築に対し、日立独自の人工知能技術「Hitachi AI Technology/H (以下、「H」と記す。)」の適用を進めている。ここでHは、大量かつ複雑なデータから、アウトカム (KPI : Key Performance Indicator) と関連が強い要素を自動的に導き出す人工知能である。実際の走行データから、Hを用いて制御モデルの候補パラメータを自動抽出することで、短期間での制御モデル構築が可能になる (図9参照)。例えば、「本線走行車両と同じ速度まで一定の加速度で加速し (加速度の変動が少ない)、そのまま本線へスムーズに合流する」という制御を実現する場合、自車両の加速度の変動率をアウトカムとして、合流時の走行データからアウトカムと関連の強いパラメータを自動抽出する。そして、本線車両との相対速度や相対距離など、自動抽出されたパラメータを参考にして有識者が制御モデルを構築する。Hを用いて無数のパラメータから候補パラメータを絞り込むことで、制御モデル構築の時間を短縮する。現在、合流時の走行データを取得し、実現性の検証を進めている。

現在の自動運転の指標は安全性であるが、今後は振動や騒音といった乗り心地に関する快適性指標も重要となる。Hは、これらの設計にも適用できる汎用的な技術となる可能性も持っており、今後検討を進めたい。

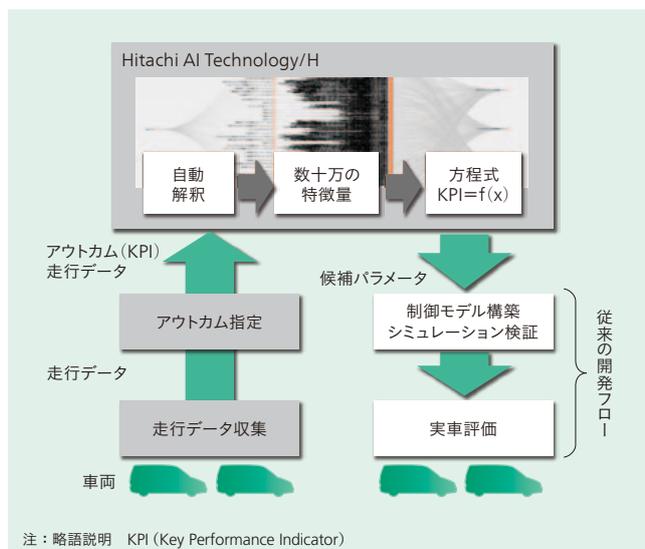


図9 | Hitachi AI Technology/Hを用いた制御モデル構築の流れ
走行データを網羅的に組み合わせた特徴量を生成し、アウトカム (KPI) との関係方程式として導出する。

6. おわりに

今後も公道実証実験などによる評価検証を重ねることで、本稿で紹介した基盤技術のさらなる適用範囲拡大と信頼性向上をめざす。その結果、これら基盤技術で実現する自動運転システムにより、交通事故削減、渋滞緩和、高齢者の移動支援といった社会課題の解決を推進していく。

参考文献など

- 1) 警察庁, 平成27年中の交通事故死者数について, https://www.npa.go.jp/pressrelease/2016/01/20160106_01.html
- 2) 日立ニュースリリース, 茨城県内の公道において自動走行システムの走行実証試験を実施 (2016.2), <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/02/0209a.html>
- 3) 城戸, 外: 車載ステレオカメラを用いた前方環境認識技術, 自動車技術会2016年春季大会 (2016)
- 4) S. Kakegawa et al.: Road surface segmentation based on vertically local disparity histogram for stereo camera, ITS World congress (2015)

執筆者紹介



志磨 健
日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンター
スマートシステム研究部 所属
現在、ステレオカメラ、画像認識技術の研究開発に従事



永崎 健
日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部
電子設計本部 車載カメラ設計部 所属
現在、ステレオカメラの画像認識アプリケーションの開発に従事



栗山 哲
日立製作所 研究開発グループ
エレクトロニクスイノベーションセンター
情報エレクトロニクス研究部 所属
現在、ミリ波レーダ向け高周波回路・実装技術の研究開発に従事
電子情報通信学会会員



吉村 健太郎
日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンター
グリーンモビリティ研究部 所属
現在、自動運転システムの研究開発に従事
博士 (情報科学)
情報処理学会会員, 機械学会会員



祖父江 恒夫
日立製作所 研究開発グループ システムイノベーションセンター
インフラシステム研究部 所属
現在、自動運転・コネクテッドカーの研究開発に従事
情報処理学会会員