

氏名	井川 直
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第140号
学位授与の日付	令和3年3月24日
学位論文の題目	モデル検査を用いた心拍モニタリングに基づく車体制御システムの高信頼化
学位審査委員会	主査 有本 和民 副査 尾崎 公一 副査 佐藤 洋一郎 副査 土屋 達弘

学位論文内容の要旨

近年のAI技術の進歩は著しく、その適用分野の一つとしてAIによる認識と制御に基づく自動運転技術は大きく発展している。自動運転下ではAIの制御に基づいてハンドル操作や速度制御が行われ、ドライバーが操作を行うことなく走行が可能となる。運転の完全自動化を実現する上ではまだ多くの課題が残されているが、ADAS（Advanced Driver-Assistance Systems：先進運転支援システム）における車間距離制御（ACC：Adaptive Cruise Control System）をはじめとした運転の部分的自動化を目的とした技術は開発が盛んに進められている。

その取り組みの一つとして、ドライバーの状態をモニタリングし、不調や異常を検出したら警告を発するとともに必要に応じて自動運転へと切り替えることで事故を未然に防ぐという試みがなされている。こういった用途においては、心拍モニタリングは特に重要な役割を担うと考えられている。心拍情報を解析することで、ドライバーの覚醒状態を判定することや虚血性心疾患をはじめとした生命への影響が大きな疾患の発生を早期に検出することが可能となる。

心拍モニタリングと運転の制御を効果的に連携するためには、高い精度で心拍の検出を行った上で、適切なタイミングでドライバーや運転への干渉を行う必要がある。心拍モニタリングは機器を直接皮膚に装着するものが主流であるが、装着時の不快感も大きくアレルギーによる負担増大も起こり得る。そのため非接触による心拍計測が望まれているが、非接触での計測は外乱の影響を強く受けるため、運転中に高精度の計測を行うことは困難である。一方で、心拍情報の解析結果に基づく運転制御については厳しい時間制約が設けられることとなり、制約を満たした上で適切な制御を実現するための高い信頼性が要求される。

本研究では、高精度な心拍モニタリングに基づく高信頼な車体制御システムを実現する。まず、車載環境での非接触センサによる心拍モニタリングの高精度化を実現するた

め、心電波形の形状に着目したフィルタリングに基づいて心拍計測を行う手法を提案する。さらに、モニタリングに基づく車体制御の高信頼化を実現するため、運転制御構造をモデル化した実時間システムを対象に、モデル検査を用いて複雑なリアルタイム制御の妥当性検証を自動的に行うための手法を提案する。

前者の非接触心拍モニタリングの高精度化については、従来技術では、MIMO レーダなどを用いて対象者の心拍を非接触で検出する手法が提案されているが、これらの技術では、外乱の多い走行中に十分な精度で心拍を検出することが難しかった。そこで本研究では、UWB (Ultra Wide Band) センサを用いることで、走行中の車内においても高精度な心拍間隔の検出を実現する。UWB センサは 500 MHz 以上の広帯域の周波数帯を利用する通信を行う無線通信方式を採用したセンサである。極めて短いパルス波を用いるため干渉に強く、障害を抑えることができる。UWB センサは近距離であれば対象物までの距離を高精度に測定できるため、拍動の微細な動きを捉えることで心拍検出にも応用が可能である。

本研究では、UWB センサとノイズフィルタリングを組み合わせることで、高精度な心拍検出を実現する。特に、心電波形では拍動に対応する R 波が周期的に発生することに着目して、特定の周波数以外の周波数を減衰するバンドパスバターワース (Bandpass Butterworth Filter) フィルタを用いることで効果的に心拍の抽出を行う。

また、後者の車体制御の高信頼化については、実時間システムのモデルの一つである時間ペトリネット (Time Petri Nets : TPN) によってモデル化された運転制御機構を対象として、モデル検査手法を用いて妥当性検証を行うための手法を開発する。

モデル検査は形式的検証技術の一つで、状態遷移グラフとしてモデル化されたシステムの網羅的探索により、システムが与えられた仕様を満たすかどうかを自動的に判定するための技術である。モデル検査は完全自動化が可能であり、かつ仕様を満たさない場合にはその証拠となる実行系列を反例として生成可能であることから、システムの品質保証に有用な技術である。しかし、システムの状態空間はその要素数に対して指数的に巨大化するため、状態爆発問題により検証が困難となる場合が起こり得る。

有界モデル検査は、状態空間の探索範囲を制限することでモデル検査問題を論理式の充足可能性判定に帰着して解く手法であり、適切な範囲を指定することで状態爆発問題を回避することが可能である。また、論理式の充足可能性判定ツールである SAT ソルバならびに SMT ソルバの性能向上も著しく、検証の高速化も期待できる。また、充足可能性判定に伴って生成される補間論理式を利用することで、全ての状態空間の探索を実現する非有界モデル検査と呼ばれる技術も開発されている。

本研究では時間ペトリネットでモデル化された実時間システムに対して、有界モデル検査を用いることで高速な検証を実現する。ここで、従来の手法では時間ペトリネットの振る舞いは線形制約 (Linear arithmetic) の論理式として表現されていたが、線形制約 (Linear arithmetic) のサブクラスである差分論理 (Difference logic) クラス

の論理式に対しては、効率的に充足可能性判定が可能であることが知られている。そこで、さらなる検証の高速化を実現するため、時間ペトリネットの振る舞いを差分論理で表現するための手法を開発する。

さらに本研究では、補間に基づく非有界モデル検査を時間ペトリネットの検証へと適用するための枠組みについても示す。非有界モデル検査を利用することで、デッドロックが存在しない、などの安全性に関わる性質の検証も可能となる。また、従来の手法ではペトリネットの safe ペトリネットという一部のクラスに限定して検証を行っていたが、safe ペトリネット以外のクラスも扱えるよう、論理式表現を拡張する。

以下本論文の構成を記す。

1 章では、本研究の背景および目的について述べる。

2 章では、心拍モニタリングに基づく車体制御システムについて述べる。

3 章では、非接触機器を用いて心拍間隔を高精度に検出する手法について述べる。

4 章では、非接触機器を用いた車載環境での心拍計測に関する実験を行い、その有効性を評価する。

5 章では、モデル検査を用いた車体制御システムの検証について述べ、有界および非有界モデル検査ならびに検査対象のモデルである時間ペトリネットについて概説する。

6 章では、時間ペトリネットを対象とした有界および非有界モデル検査の適用ならびにその高速化のための技術について述べる。

7 章では、提案手法による時間ペトリネットの検証コストについて、適用実験を通して評価する。

最後に 8 章で本論文をまとめる。

主業績

No.1	
論文題目	車内における RRI 計測を目的とした非接触心拍モニタリングシステムの検討
著者名	井川 直, 横川 智教, 藤井 健斗, 茅野 功, 佐藤 洋一郎, 有本 和民
発表誌名	電気学会論文誌 E, Vol.10, No.140, pp.256-264, 2020
No.2	
論文題目	Symbolic Representation of Time Petri Nets for Efficient Bounded Model Checking
著者名	Igawa Nao, Yokogawa Tomoyuki, Amasaki Sousuke, Kondo Masafumi, Sato Yoichiro and Arimoto Kazutami
発表誌名	IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.103, No.3, pp.702-705, 2020

副業績

No.1	
論文題目	An In-Vehicle Contact-less Heartbeat Monitoring System Using UWB Sensor
著者名	Nao Igawa, Tomoyuki Yokogawa, Yoichiro Sato, Kazutami Arimoto, Isao Kayano
発表誌名	電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌), vol.139, No.10, pp.366-367, 2019
No.2	
論文題目	Interpolation Based Unbounded Model Checking for Time Petri Nets
著者名	Nao Igawa, Tomoyuki Yokogawa, Sousuke Amasaki, Kiyotaka Komoku, Yoichiro Sato and Kazutami Arimoto
発表誌名	2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018), IEEE, 2018/10/11
No.3	
論文題目	SMT ソルバを用いた時間ペトリネットの非有界モデル検査
著者名	井川直, 横川智教, 近藤真史, 佐藤洋一郎, 有本和民
発表誌名	システム数理と応用研究会, 電子情報通信学会, 2019/01/16

論文審査結果の要旨

近年の自動運転技術開発の取り組みの一つとして、ドライバの状態をモニタリングして事故を未然に防ぐという試みがなされている。特に心拍情報を解析することで、ドライバの覚醒状態を判定することや疾患の発生を早期に検出することに大きな期待がある。

心拍モニタリングと運転の制御を効果的に連携するために、高精度な心拍検出を行った上で、適切なタイミングでドライバや運転への干渉を行う必要がある。心拍モニタリングは非接触での計測が望まれているが、外乱の影響を強く受けるため、運転中に高精度の計測を行うことは困難である。一方で、心拍情報の解析結果に基づく運転制御については厳しい時間制約が設けられることとなり、制約を満たした上で適切な制御を実現するための高い信頼性が要求される。

上記の背景から本論文では、高精度な心拍モニタリングに基づく高信頼な車体制御システムの実現を目的とし、車載環境での非接触センサによる心拍モニタリングの高精度化を実現するため、心電波形の形状に着目したフィルタリングに基づいて心拍計測を行う手法を提案する。さらに、モニタリングに基づく車体制御の高信頼化を実現するため、運転制御構造をモデル化した実時間システムを対象に、モデル検査を用いて複雑なリアルタイム制御の妥当性検証を自動的に行うための手法を提案する。

非接触心拍モニタリングの高精度化について、従来技術の MIMO レーダなどを用いた心拍検出では、外乱の多い走行中に十分な精度で心拍を検出することが困難であることから、UWB (Ultra Wide Band) センサを用いることで、走行中の車内においても高精度な心拍間隔の検出を実現した。UWB センサは 500 MHz 以上の広帯域の周波数帯を利用し極めて短いパルス波を用いるため干渉に強く、提案したノイズフィルタリングを組み合わせることで、高精度な心拍検出が実現可能なことを明らかにした。

車体制御の高信頼化に対しては、実時間システムのモデルの一つである時間ペトリネット (Time Petri Nets) によってモデル化された運転制御機構を対象として、モデル検査手法を用いて妥当性検証を行う手法を開発した。特に、リアルタイム性を保証するための時間制約を対象とした、論理式の充足可能性判定に基づく有界モデル検査技術の適用について、時間ペトリネットの振る舞いを差分論理と呼ばれる論理式のクラスで表現することで、高速な検証を実現した。

以上の結果より、本論文の内容は、学術的、実用的価値が極めて高いものと判断し、本学位論文審査委員会は博士 (工学) の学位に値すると認める。