

## 次世代モビリティと持続可能な社会の実現に向けて

山本, 薫  
九州大学大学院システム情報科学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/6790815>

---

出版情報 : 計測と制御. 60 (7), pp.509-513, 2021-07-27. The Society of Instrument and Control Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2021 The Society of Instrument and Control Engineers

# 次世代モビリティと持続可能な社会の実現に向けて

山本 薫\*

\*九州大学 福岡県福岡市西区元岡 744  
 \*Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, Japan  
 \*E-mail: yamamoto@ees.kyushu-u.ac.jp

キーワード：隊列走行 (platooning), 空飛ぶクルマ (flying cars), ネットワーク化制御 (networked control), 持続可能性 (sustainability).  
 JL 0007/21/6007-0509 ©2021 SICE

## 1. はじめに

本稿では、車両群の隊列走行や空飛ぶクルマ等の自律移動車両群の制御における筆者の近年の取り組みを紹介し、本特集号のテーマである「さまざまなものをつなぐ」ということについて考察する。

はじめに、筆者の背景を少し述べたいと思う。筆者は、学部・修士課程まで建築学を専攻しており、特に建物の免震・制振設計に関する研究に取り組んでいた。免震構造では、地震動の卓越周期を避け共振を防ぐよう建物と免震層を設計する。また、制振設計では、建物の形状や構造形式等の条件から、最適な制振装置の設計・配置を行う。「対象をよく理解した上で最も効果的なアプローチを探る」というプロセス自体に興味を湧き、博士課程から専攻を制御工学とし、現在に至る。特に、以下に述べる1次元質点系の解析や制御系設計について継続して取り組んでいる。

### 高層建物の振動制御

高層建物の振動制御において、最も基本的なモデルとして、図1に示すような質点系モデルがある。その形状から、建築・土木分野では「串団子モデル」とも呼ばれ、親しまれている。地震動は固定端への外乱入力として表現される。各質点はばねでつながっているため、連成振動となり、質点の数が多ければ多いほど複雑な挙動を示す。これをいかに制御・抑制するかが課題となる。制振装置は質点間、最下部または最上部に配置されるが、質点間変位等の局所情報に基づき全体の挙動を制御するという点で、ネットワーク化制御における分散制御の一種と捉えることもできる。

### 車両群の隊列走行

また、図2に示すように、自動運転車両群の隊列走行も質点系として表現できる。隊列走行では、一般に、渋滞解消や空気抵抗低減に起因する燃費向上のため、狭い車間距離を維持することが求められる。一定車間距離維持のための制御を、質点間の引力と斥力により実現するものとして捉え、仮想のばね、ダンパー、イナーター、あるいはより一般に、インピーダンスを設計する問題として扱うことができる。隊列走行では、個々の車両が安定に制御されていたとしても、外乱による影響が隊列に沿っ

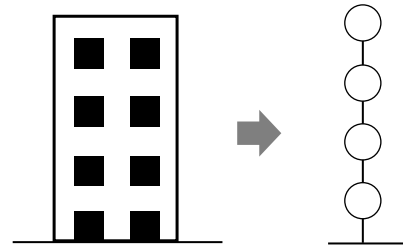


図1 質点系モデル：高層建物の動的解析における基本モデル  
 各階床位置に質量を集中させその質量をばねや減衰要素でつなぐ。

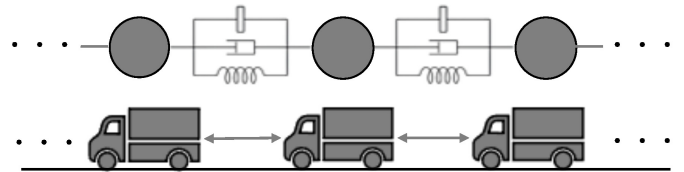


図2 隊列走行における双方向制御の質点系モデル  
 一定車間距離維持のための制御を質点間の引力と斥力と捉える。

て伝搬・増幅していく「ストリング不安定現象」に注意する必要がある。これは、隊列走行における群安定性の概念であるといえる。高層建物における共振現象のように、外乱の卓越周波数と隊列の固有振動数（主に車両数と仮想ばね定数により決まる）との関係はストリング安定性に重大な影響を与えるが、車両の参加・離脱により車両数が増減する場合があるため、この点を踏まえた設計が重要となる。

筆者は、博士課程在籍中にこのような研究に従事し、以来、多数のサブシステムの結合で表わされる系、さらには、サブシステムの参加・離脱によりネットワーク構造やその結合状態が時変であるような系の安定性解析や制御に興味をもち、研究を続けている。

### 本稿の構成

第2章では、車両群の隊列走行の例を用いて、群の安定性や制御性能について述べる。隊列走行では、渋滞解消や燃費向上等を目的とし、車両同士を仮想的につなぐことで狭い車間距離を実現する。一方で、いったん外乱が隊列に入力されると、隊列が振動的になるなど、ストリング不安定現象を生じることもある。これは、多くの車両をつなぐことによる弊害ともいえる。

第3章では、近年世界各国で研究開発が加速している空飛ぶクルマの近況について述べる。空飛ぶクルマは完全自動運転による運用が想定されており、大規模な自動管制システムによる集中運航制御などの検討も始められている。多数の空飛ぶクルマが同じ空域を飛行するような場合には、機体間通信による速度・加速度情報のやり取りや、相対位置計測情報に基づく制御は必須となるであろう。その他、管制システムが気象情報や渋滞情報などに基づき集中制御的に全機体の運航管理を行う方式も議論されている。実現すれば、まさに、多種多様なモノをつなぐシステムの実例といえる。

最後に、第4章では、これら次世代モビリティの実現に向けた今後の展望と課題について、持続可能性の観点も踏まえ、筆者の考えと、今後のSICEへの期待を述べる。

## 2. 車両群の隊列走行

隊列走行車両群の制御問題における初期の大規模なプロジェクトとして、国内では旧建設省（現国土交通省）が主導したAHS（Advanced Cruise-Assist Highway Systems: 走行支援道路システム）プロジェクトにおける1995年と1996年のデモがある。また、国外では、カリフォルニア大学バークレー校のPATHプロジェクトにおける1997年のデモが有名である。これらのプロジェクトにおいては、車間距離制御や車両速度制御にはレーダによる計測や車車間通信が用いられたが、操舵制御には路面に埋め込んだ磁気マーカを車両搭載のセンサで検知する仕組みがとられ、インフラ整備を前提としていた。

その後、通信・計測技術や自動運転技術の目覚ましい進歩により精度や信頼性は大幅に向上しており、世界各国で実用化に向けた研究開発が推進されている。操舵制御は白線検知による方法が主流となり、初期のプロジェクトのような道路インフラ整備を必要としなくなったことも特徴のひとつである。

隊列走行は、全車両の始点と終点が等しい隊列固定型と、各車両が目的地を異にする柔軟型とに分かれる。後者の場合、目的地に近づいた車両が隊列から離脱することや、新たな車両が隊列に参加することを許容する（図3）。この際、車間距離調整のための隊列内車両の加減速が発生するが、車間距離制御則によっては、その影響が隊列に沿って増幅してしまう場合がある。この増幅率が車両数の増加に伴い上限なく増大してしまうのか、それともある有限値におさまるのか、といった問いは、車両群全体の安定性問題として捉えることができ、「ストリング安定性」として種々の数学的な定義が与えられている<sup>1),2)</sup>。また、外乱と隊列の制御系の関係によって、最も振動的な挙動を与える車両数が異なる（なお、ここでは路面外乱等に加え、隊列車両の急加減速なども外乱とよぶ）。たとえば、図4は、先頭車両がある時刻に急加速した場合の後続車両の挙動を、隊列を構成する車両数が5台、20

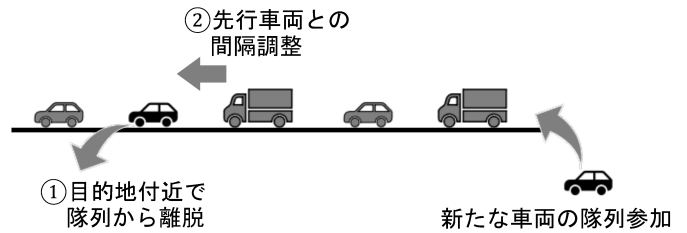


図3 柔軟な隊列走行のイメージ

隊列は新規車両の参入や既存車両の離脱を許容する。その際、車間距離調整のための隊列内車両の加減速が生じ、隊列が振動的な挙動を示す場合がある。このような現象を、隊列のサイズに依らず抑制することは、隊列の安全性の確保のためきわめて重要である。

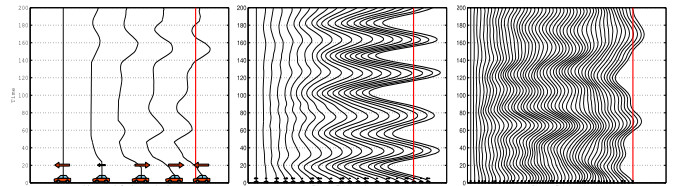


図4 隊列を構成する車両数による外乱抑制性能の変化

左から、5台・20台・50台。縦軸は時間、横軸は先頭車両からの相対距離を表わす。図中の赤直線はすべての車両で所望の車間距離が保たれた場合の最後尾車両の位置を示す。先頭車両の加速（外乱）により増加した車間距離を調整するため後続車の加減速が生じ、隊列が振動的になっているようすがわかる。また、この例では、20台の場合が最も振動的であり、必ずしも車両数が多いほど振動抑制性能が悪化するわけではないことを示唆している。これは、高層建物の共振現象と類似の現象として捉えることもできる。

台、50台の場合について数値シミュレーションで示したものである。後続車は先頭車両の急加速によって生じた車間距離誤差を速やかに解消する必要があるが、特に20台の場合において隊列が振動的になっていることがわかる。実用化のためには、いかなる車両数においても優れた外乱除去性能を有するシステム設計が不可欠である。筆者は、これを局所的な計測・通信のみで、極力シンプルな手法により実現することを目指している。

## 3. 空飛ぶクルマ

このような背景から、筆者は、所属する九州大学において、先進電気推進飛行体センター<sup>3)</sup>で「空飛ぶクルマ」の運航制御システム研究開発にも携わっている。当センターは、超伝導技術を用いた電気推進システムを搭載した次世代の飛行体の研究開発に取り組んでおり、電気推進航空機や空飛ぶクルマへの応用を目指している。

「空飛ぶクルマ」とは、大衆的な空の乗り物を指す用語であり、現在世界中で機体開発や制度設計に関する提案が活発に行われている。クルマといっても、地上を走る車が空も飛ぶというわけではなく、形態として特に有力視されているのが、滑走路が不要な電動垂直離発着機、eVTOL (electric Vertical Takeoff and Landing Aircraft) である。個人単位での所有が視野に入れられていることもあり、完全自動操縦による運航が求められてい

る。山岳地帯が国土の70%を占める日本においては、道路・橋梁・トンネルの整備・補修に多大なコストがかかるが、空の移動の大衆化により、その負担が軽減されることや、山岳地帯の有効活用促進等による経済効果が期待されている。一方で、地上スタッフ配備や機材導入等によるコスト増が予想されることから、運航機数を増やして1台あたりの運航管理費用の効率化を図る必要性も指摘されている<sup>4)</sup>。国内では、経済産業省、国土交通省が官民協議会を2018年度に立ち上げ、自動車、通信、電機、重工、電池、航空業界が参画し、2020年代に実現を図るためのロードマップを作成した(図5)。航空機産業の規模の大きい欧米ではさらに活動が活発であり、Airbus、Boeingなどの既存の航空機メーカーだけでなく、多数のベンチャー企業による開発競争が加速している。

空飛ぶクルマにおいては、技術的課題だけでも多岐にわたるが、規制面や制度設計、社会受容性等、検討すべき課題は多種多様である。たとえば、以下のような課題が挙げられる。

- 技術的課題
  - － 機体開発と制御(軽量化, 姿勢・飛行制御, 推進システム開発, 自動運転, 衝突回避技術, 騒音対策, フェイルセーフ機構等)
  - － 運航制御システム開発(管制システムによる集中制御系設計, 機体間通信・計測に基づく分散制御系設計等)
  - － 通信・計測・自己位置推定技術(5Gネットワークや準天頂衛星システム「みちびき」の活用)の検討,

センサフュージョン等)

- 法整備・制度整備
  - － 型式証明・耐空証明等の安全認証方式の検討
  - － 無線使用における電波法との関わり
  - － 事故の際の責任の所在
- 社会受容性
  - － 市場価値(ビジネスモデルとして成立するか)
  - － 都市計画(離発着場建設等)
  - － 環境負荷・持続可能性の検討

便宜的に各項目を「技術的課題」「法整備・制度整備」「社会受容性」に分類したが、たとえば、法整備・制度整備が技術開発の方向性に大きく関わってくることはいうまでもない。また、制度設計や環境整備に対し、技術的な観点からの提言を積極的に行っていくことも重要である。以下では、数ある課題のうち、運航管理システムの現状と、空飛ぶクルマの環境負荷について述べたのち、「柔軟な群制御」を空飛ぶクルマの運航制御に取り入れることについて、筆者の考えを述べる。

### 3.1 空の交通管理

現在、旅客機などの有人航空機では、航空交通管理(ATM: Air Traffic Management)により、ほかの航空機や障害物との衝突を防ぎつつ円滑な運航の管理がなされている。近年の無人航空機の産業利用の急速な拡大を背景に、ATMの無人航空機版ともいえるUTM(Unmanned Aircraft System Traffic Management)の必要性が認識されてきている。ATMでは管制官が空域状況を一元的に把握した上でパイロットに指示を送るのに対し、遥かに多数の飛行体を比較的低コストで運用する必要のあるUTMでは、自動化を基本としたシステム設計が重要となると考えられている。

UTMの概念は、米国NASAにより2014年に提唱され、低高度を利用する無人航空機の交通管理の必要性が唱えられた。基本的にはUTMが一元的に情報を管理し、事前認証された各無人航空機とやり取りをする集中制御方式が想定されているが、実際の運用にあたっては、プライバシー保護やスケラビリティの観点から、図6に示すような、市場化を伴う階層的な構造が提案されている。NASAの発表によると、自身が提示した技術レベル(TCL: Technology Capability Level)(図7)の最高レベルであるCapability 4の実証実験を2019年5月から8月にかけて行い、都市部における複数ドローンの目視外飛行実現のためのサービス提供を目指す段階にあるとのことである。日本でも、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト(DRESSプロジェクト)」において、わが国におけるUTMの開発が進められている。

空飛ぶクルマは旅客機と同レベルの安全性が担保される必要があるという点からすると、ATMによる管理が

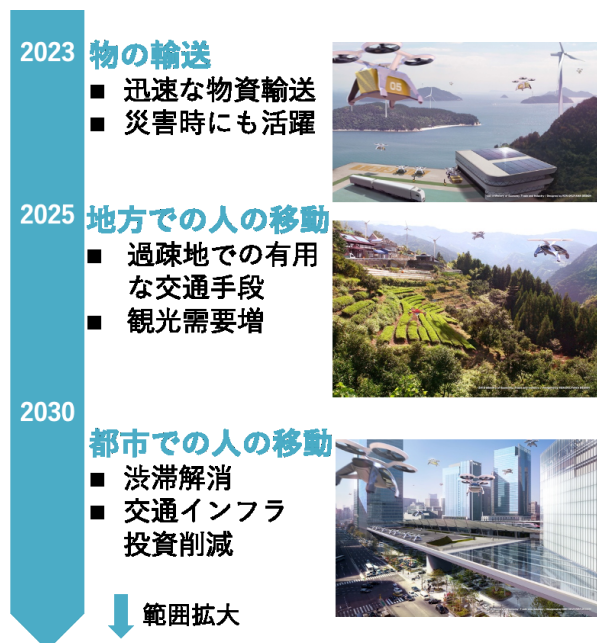


図5 “空飛ぶクルマ”の実現に向けたロードマップ概要  
 画像出典: 経済産業省ウェブサイト (<https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007.html>)

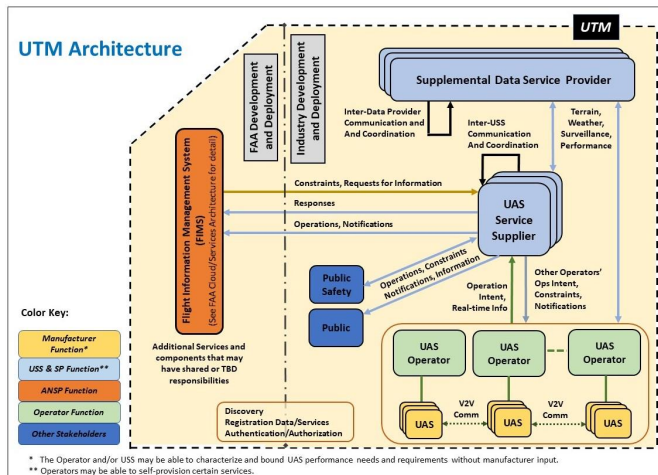


図6 FAA/NASAによるUTMのシステム構想<sup>5)</sup>

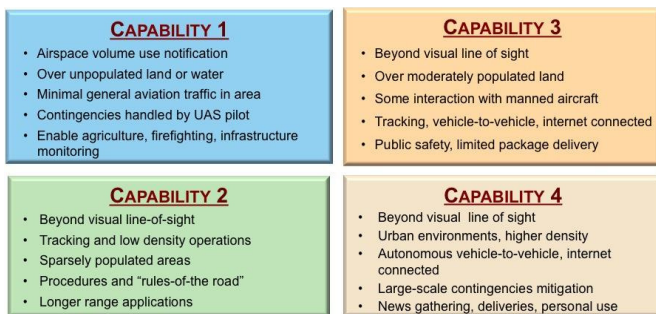


図7 NASAによるUTMの技術レベル<sup>6)</sup>

適切であるといえるが、将来的に多数の空飛ぶクルマの運航を想定するならば、UTMのように、管制システムの自動化を検討する必要もあるだろう。実際、ATMによる集中制御とUTMによる分散協調管理とを適切に組み合わせた新たな管理基盤の構築の必要性も指摘されている<sup>7)</sup>。

### 3.2 環境負荷

これまで述べたように、空飛ぶクルマに関する研究開発では、制度設計や管理体制、種々の技術課題など、多方面で活発な議論が繰り広げられている一方で、その環境負荷に関する検討は、十分になされていないように思う。

全世界で排出されるCO<sub>2</sub>のうち約2%は航空分野から排出されている。さらに、国際民間航空機関ICAOの予測では、2025年までの航空輸送量の伸びに応じ、CO<sub>2</sub>排出量は、このままいけば2050年には現在の2倍ないし5倍に達すると予測されている。これを受け、国際航空運送協会(IATA)は、技術革新により2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を2005年時点と比べ半減させることを各国政府に求めている。多数の空飛ぶクルマを運用することは、このような社会の動きに逆行することになりはしないか、慎重な議論が必要であると考え。乗員ひとりでも100 km離れた地点を移動する場合には、eVTOLはガソリン自動車よりも温室効果ガス排出量が35%低減される

が、電気自動車と比べると28%上昇するとの試算結果も報告されている<sup>8)</sup>。また、ティルトローター型やダクト型、翼型のeVTOLは、巡航時のエネルギー効率が良いものの、離着陸時に多くのエネルギーを消費することから、航続距離がエネルギー効率に大きく関わってくる。現在、空飛ぶクルマの動力開発の主流はバッテリーであるが、エネルギー密度の限界から、長航続距離の実現は難しいとみられている。九州大学先進電気推進飛行体研究センターでは、超伝導推進システムによる長距離飛行の実現を目標に掲げているが、環境負荷低減の観点からも、具体的な数値目標等の検討を進める必要がある。

さらに、多数機体の運航制御においては、運航管理システムにおける膨大な情報処理および通信のための大量の電力消費が予想される。また、システムが複雑化すればするほどその傾向は顕著であると考えられる。とはいえ、安全性の担保のためにはシステムに冗長性をもたせることも重要であるため、複雑化はやむを得ない側面もあり、非常に難しい課題である。

### 3.3 空飛ぶクルマにおける柔軟な群制御

第3.1節で述べたように、少なくとも現時点では、空飛ぶクルマが完全自律飛行で自由に空を飛び回るような運用は想定されておらず、管制システムへの事前の機体登録や運航予約などを課した上での、中央集権的な集中制御方式による運用が現実的な解として有力視されている。しかし、将来的な機体数の増加も考慮すれば、計算負荷の増大により、集中制御方式のみによる運用は困難となることが予想される。また、局所的・突発的な障害物回避は、機体レベルで達成される必要があるだろう。加えて、第3.2節で述べたように、管制システムでの膨大な情報処理に伴う過剰な電力消費は、持続可能性の観点から望ましくない。

そこで、筆者は、第2章で述べたような「柔軟な群制御」を空飛ぶクルマにおいて実現できれば、と考えている。この場合、衝突回避や機体間距離制御等はすべて機体搭載のセンサ類やコンピュータにより達成する、分散制御方式が基本となる。この場合、CPUの性能に限界があるため、極力シンプルな制御則の設計や、計算効率の良いアルゴリズムの開発が重要となるだろう。大まかな航路設計は管制システムが行うとしても、大部分を分散制御により実現することで、より自由度が高く、かつ持続可能なシステムを構築することができるのではないかと考える。

## 4. 今後の展望と課題

隊列走行や空飛ぶクルマなど、次世代モビリティの動向について、特に群制御の観点で述べた。車両群や機体群の安全で安定した移動の実現を目指し、適切なネットワーク構造の検討や、システム設計について、引き続き取り組んでいきたいと考えている。加えて、今後は「持

持続可能性」の視点を積極的に取り入れていく必要性を感じている。

2015年9月に国連サミットで採択された持続可能な開発目標「SDGs (Sustainable Development Goals)」は、近年耳にする機会も増え、研究や教育現場だけでなく、広く社会に浸透してきているように思う。少しずつではあるが、社会の価値観は変容しつつある。実際、新しい製品や技術が社会に受け入れられるためには、持続可能性の観点かもはや欠かせないものになっているとよい。しかしながら、空飛ぶクルマの例においてもそうであるが、新しい技術が議論される際、持続可能性の観点はまだまだ付け足しのような扱いに留まっているように感じられる。

これについて、IEEE Control Systems Society の前会長 Chong は、会長就任時のメッセージ<sup>9)</sup> で以下のよう

Sustainability is a noble goal. However, there are salient contrasts between sustainability and technology worth highlighting that might explain why some technologists have trouble relating to sustainability as a goal. First, issues in sustainability often involve slow timescales, while technology often involves fast timescales. Second, sustainability is an idea that is inherently cautious, perhaps even associated with pessimism about the future. On the other hand, technology is often associated with optimism about the future.

要は、慎重さを必要とする持続可能性への取り組みは結果が出るまで長期に及ぶもので、時に悲観主義的であるのに対し、新技術が社会に受け入れられるためには、短期的に達成しうる夢のある未来を楽観的に語る必要がしばしばあるというところに、難しさがあるのだろう。

一方で、持続可能な社会の実現には、「環境保全」と、「人々が便利で安心な暮らしを享受するための経済成長や技術革新」との調和が重要であるのは、SDGsの掲げる目標からも明らかである。これからの社会では、この悲観主義と楽観主義の対立の構図を打破し、積極的な取り

組みを推進していく必要がある。筆者は、さまざまな異種の評価指標を扱い、制約のもとでの最適化や問題解決を主たる課題として扱ってきた SICEこそ、その主導的な役割を担うべきと考えている。

(2021年3月22日受付)

#### 参考文献

- 1) D. Swaroop and J. Hedrick: String Stability of Interconnected Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **41**-3, 349/357 (1996)
- 2) S. Feng, Y. Zhang, S. E. Li, Z. Cao, H. X. Liu, and L. Li: String Stability for Vehicular Platoon Control: Definitions and Analysis Methods, *Annual Reviews in Control*, **47**, 81/97 (2019)
- 3) 九州大学先進電気推進飛行体研究センター, <http://riaepa.sc.kyushu-u.ac.jp/index.html>
- 4) 中野 冠: 空飛ぶクルマ開発の現状と未来, 空飛ぶクルマ—空のモビリティ革命に向けた開発最前線, 中野冠 監修, 3/9, エヌ・ティー・エス (2020)
- 5) Federal Aviation Administration: UTM Concept of Operations Version 2.0, [https://www.faa.gov/uas/research-development/traffic\\_management/media/UTM\\_ConOps\\_v2.pdf](https://www.faa.gov/uas/research-development/traffic_management/media/UTM_ConOps_v2.pdf) (2020)
- 6) T. Prevot, et al.: UAS Traffic Management (UTM) Concept of Operations to Safely Enable Low Altitude Flight Operation, *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (2016)
- 7) 岡田, 山下: “統合的” 管理基盤の構築, 空飛ぶクルマ—空のモビリティ革命に向けた開発最前線, 中野冠 監修, 59/65, エヌ・ティー・エス (2020)
- 8) A. Kasliwal, et al.: Role of Flying Cars in Sustainable Mobility, *Nature Communications*, **10**-1, 1/9 (2019)
- 9) E. K. Chong: Control and Sustainability [President's Message], *IEEE Control Systems Magazine*, **37**-5, 8/10 (2017)

#### [著者紹介]

やまもと かおる  
山本 薫 君 (正会員)



2011年京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士課程修了, 船井情報科学振興財団および Cambridge Overseas Trust の支援のもと 2016年英国ケンブリッジ大学情報工学科博士課程修了, PhD. 米国ミネソタ大学, スウェーデン・ルンド大学でのポスドクを経て, 2018年8月より九州大学大学院システム情報科学研究院准教授となり現在に至る。ネットワーク化制御, 分散制御, 機械系の振動制御, サンプル値制御系などの研究に従事。