

安全性・快適性・航続距離を向上させる電気自動車の 自動運転・制御技術とワイヤレスインホイールモータの開発

東京大学

藤本 博志 (fujimoto@k.u-tokyo.ac.jp)



<http://hflab.k.u-tokyo.ac.jp/>

Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

1 / 41



NHK "Science Zero"



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

3 / 41

電気と制御で走る未来の車

[Y.Hori, TIE '04]



モータの最大の特徴 →高い制御性

■高速トルク応答(制駆動力)

モータのトルク応答(1ms)

>> エンジンのトルク応答(500ms)

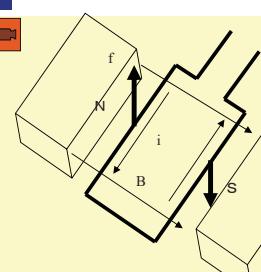
→ 車輪のスリップ防止制御

■正確なトルク値の把握

→ 路面状態の推定

■モータの分散配置、各輪独立駆動

→ 2次元車体運動の制御



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

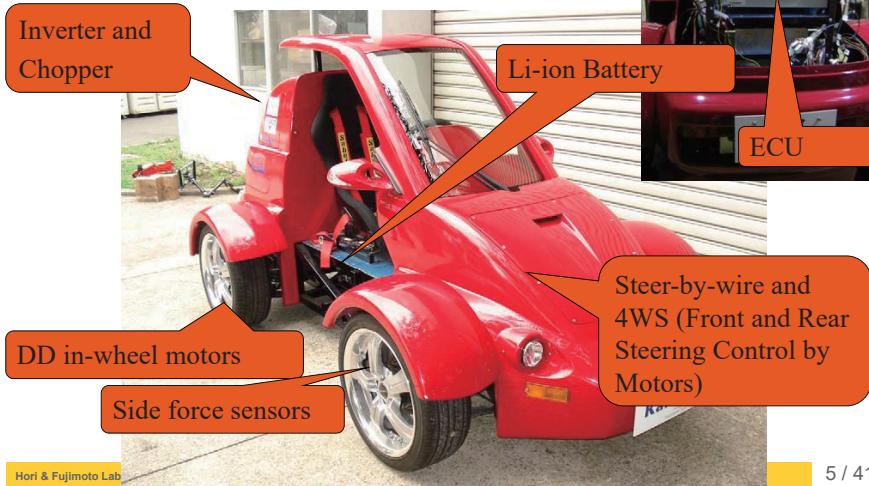
Contents

1. Introduction
2. Development and Control of Original EV FPEV2-Kanon
3. Braking Control by Regenerative Torque
4. Driving Comfort Improvement
5. Development of wireless In-wheel motor
6. Range Extension Autonomous Driving
7. Conclusion

4 / 41

2.2 FPEV-2 Kanon

Future Personal Electric Vehicle

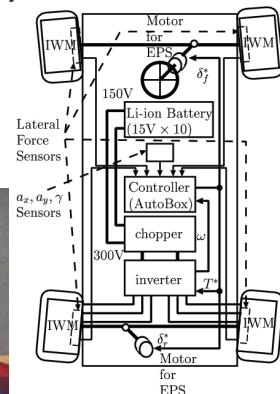


2.2 Active Front/Rear Steering System



- 2 DC Motors (Maxon 250W) for Steering

- Front steering shaft is removable.
→Steer-by-wire



2.2 Principle of Driving Force Estimation

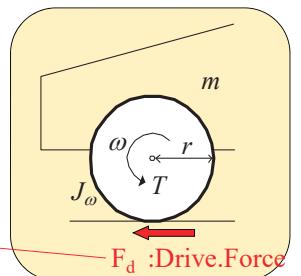
Motion Equation of Wheel

$$J_{\omega} \frac{d\omega}{dt} = T - rF_d$$

Inertia of wheel
→Constant

Angular Accel.
→Measured by Sensors

Radius of wheel
→Measured by Current



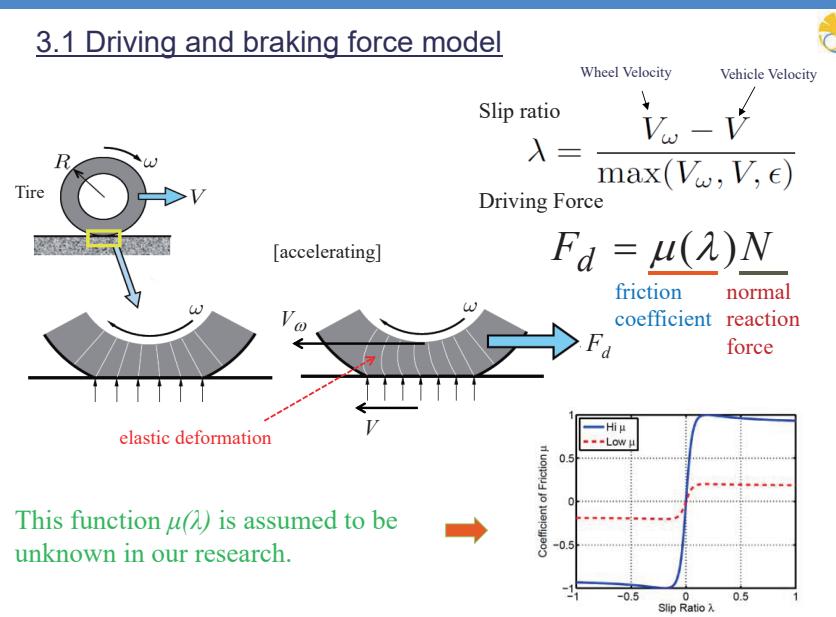
Driving Force F_d can be estimated by this equation. In our system, it is calculated realtime with 0.1ms sampling.

Driving force observer [Hori, TIA '98]

Contents

1. Introduction
2. Development and Control of Original EV FPEV2-Kanon
3. Braking Control by Regenerative Torque
4. Driving Comfort Improvement
5. Development of wireless In-wheel motor
6. Range Extension Autonomous Driving
7. Conclusion

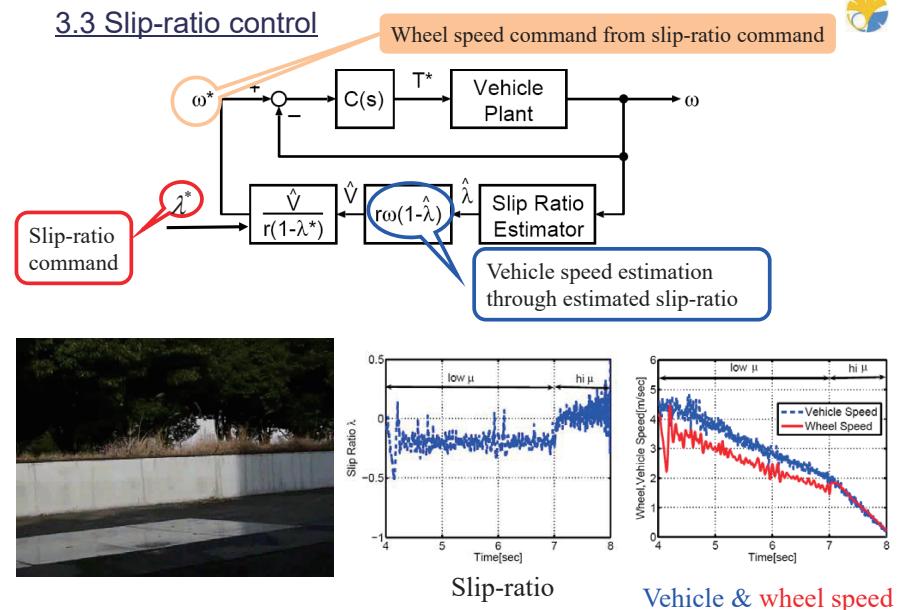
3.1 Driving and braking force model



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

9 / 41

3.3 Slip-ratio control

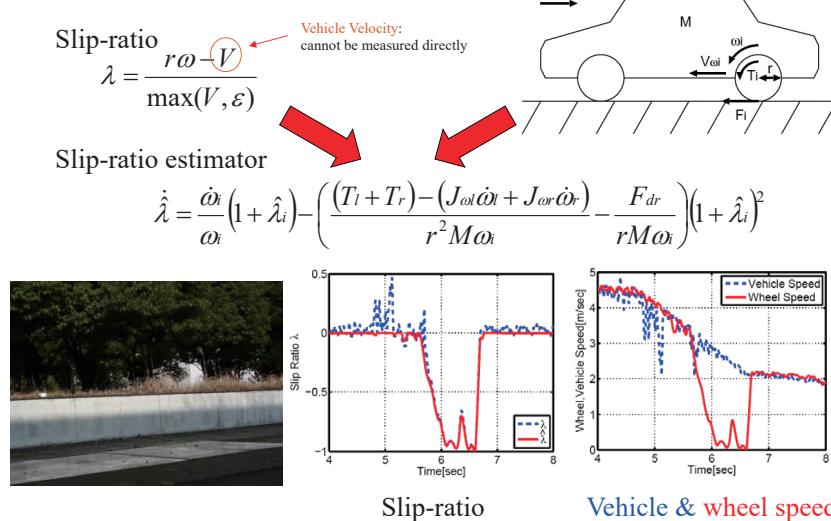


Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

11 / 41

3.2 Slip-ratio estimation on braking without detection of vehicle speed

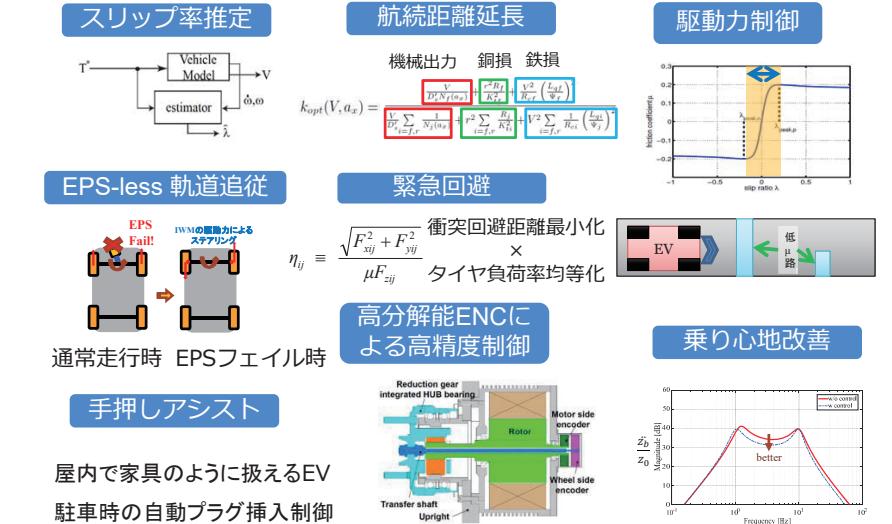
[Suzuki, Fujimoto, AMC2010]



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

10 / 41

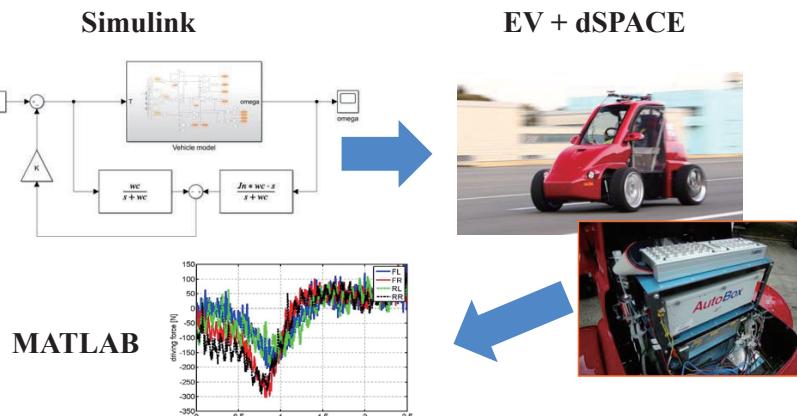
3.4 堀・藤本研究室におけるEV運動制御研究の紹介



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

12 / 41

3.5 EV運動制御研究へのMATLAB/Simulinkの活用



- ✓ リアルタイムハードウェアへのシームレスな自動実装
- ✓ MATLABでの実験データ解析

Your question:

OK, I understood IWM can enhance safety. But I heard that heavier unsprung mass worsens driving comfort. Is it true?



m=32kg

My answer:

This is not the problem anymore.

4.1 Comfortable braking by regenerative torque of in-wheel motor



[Sato, Fujimoto IECON'08]

Vibration suppression control of pitching movement

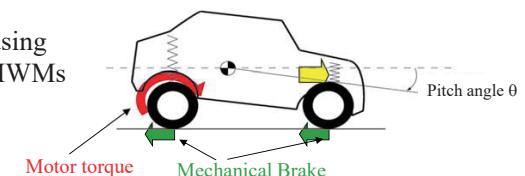
Without control



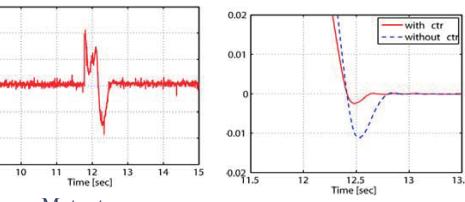
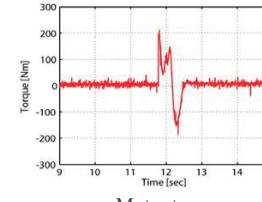
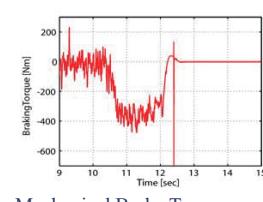
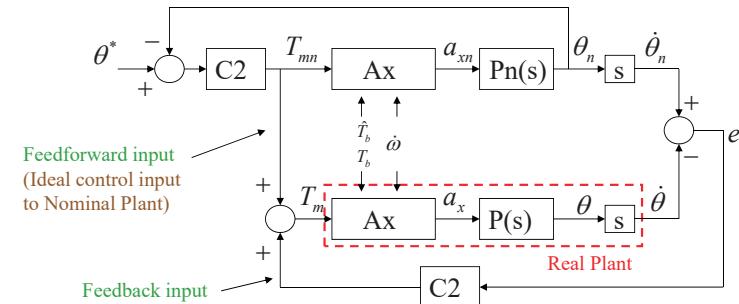
With control



Soft stop by pitching control using driving and braking torque of IWMs



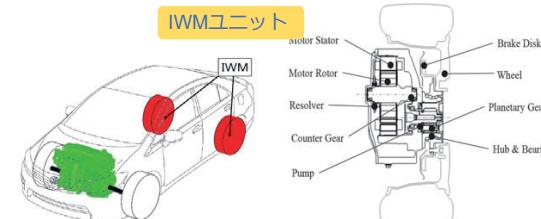
4.2 Pitching control results



4.4 IWMを用いた高帯域制振制御

「インホイールモータ車両の実験モード解析に基づく高帯域前後振動制御」, 自技会秋季大会2017 (東大藤本研とトヨタの共研)

実験車両

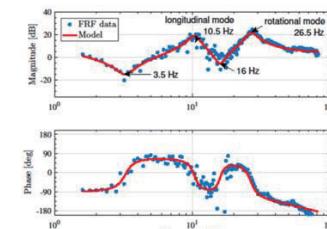


- IWMによる後輪駆動（本研究では前輪は駆動せず）
- ばね上とばね下に加速度センサ
- IWM角度を検出するレゾルバ

クオーターカーモータベンチ



- 実車と同じIWMユニットを持つ単輪試験機
- 垂直荷重を変更可能（接地状態と非接地状態）



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

18 / 41

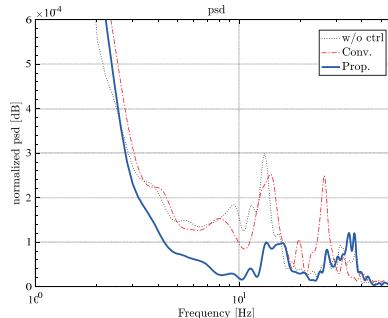
4.5 IWMを用いた高帯域制振制御（実験結果）



ステップ応答時のばね上加速度のPSD

目標値応答特性

- 静止状態から前後加速度にステップ指令



- 従来法は、1次モードを抑制しているが、2次モードを励起
- 提案法は双方のモードを抑制した高帯域特性

振動ピークのない高帯域な前後応答特性の実現

Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

19 / 41

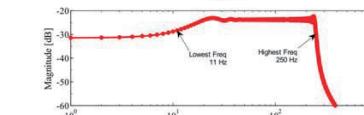
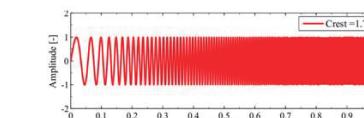
4.7 インホイールモータ車のモデリングでのMATLABの活用



マルチサインを用いたシステム同定

Signal A: Swept Sine

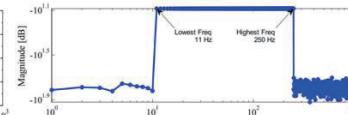
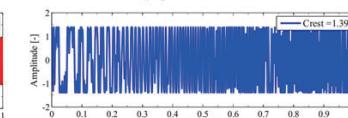
$$u(t) = A \sin((at + b)t), \quad 0 \leq t \leq T$$



Analytical – no memory
Servo Analyzer

Signal B: Schroeder Multisine

$$u(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k)$$



Optimized – memory necessary
Proposed Analyzer

R.Pintelon and J.Schoukens,
“System Identification: a frequency domain approach”
IEEE Press: Piscataway, New Jersey (second edition), 2012.

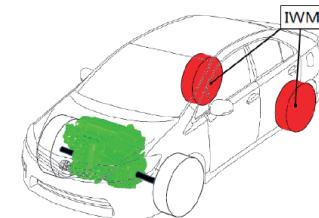
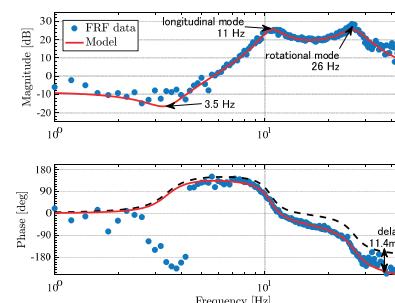
Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

21 / 41

4.7 インホイールモータ車のモデリングでのMATLABの活用



IWMによる加振



- マルチサイン信号をトルク指令に印加
- モータトルクからばね下前後加速度の特性
- 11 Hzに前後モード、26 Hzに回転モード
- CAN通信による往復むだ時間：11.4 ms

フィッティングにより
正確なパラメータ値を取得

GitHub ツールボックスを公開中！

<https://github.com/HoriFujimotoLab/FdiTools>

Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

22 / 41

5.1 第二世代ワイヤレスインホイールモータの開発

[Fujimoto, et.al JSAE '17]

世界初 道路からインホイールモータへの走行中ワイヤレス給電による実車走行に成功



キーワードは「走行中給電」と「インホイールモータ」

5.2 走行中給電とは

電池の残りを気にせず乗れる電気自動車って？

いまの電気自動車の課題は、
ガソリン車等に比べて航続距離が短いこと

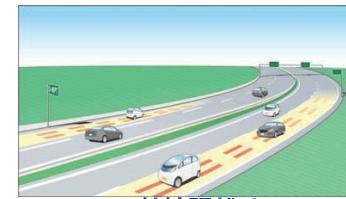


解決方法1: バッテリをたくさん積む

- クルマが重くなる ⇒ 必要なエネルギーが増えてエコでない
- コストが高くなる

解決方法2: 走行中給電

- 電車のようにクルマが走りながら電気を受け取る
- 道路からワイヤレスで電気を送る



航続距離は∞

5.3 これまで検討されてきた走行中給電

日本, アメリカ, 欧州, 韓国など世界的に研究されているが…



FABRIC (フランス) : 120km/h, 20kW, 100m



KAIST (韓国)

http://english.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/681770.html

- いずれも
- ・オンボードモータのEV
 - ・車載バッテリへの給電
- を想定したもの

本研究でインホイールモータならではの
走行中給電を開発

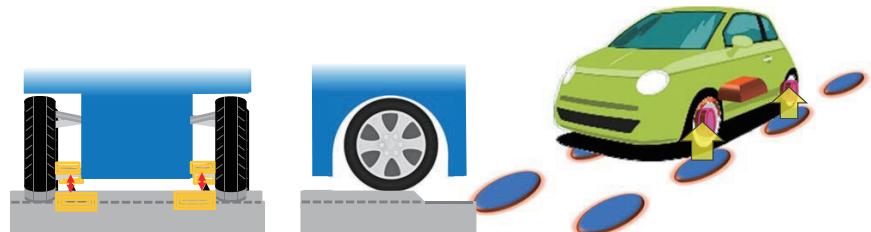
5.4 新しい走行中給電のかたち

インホイールモータに直接走行中給電

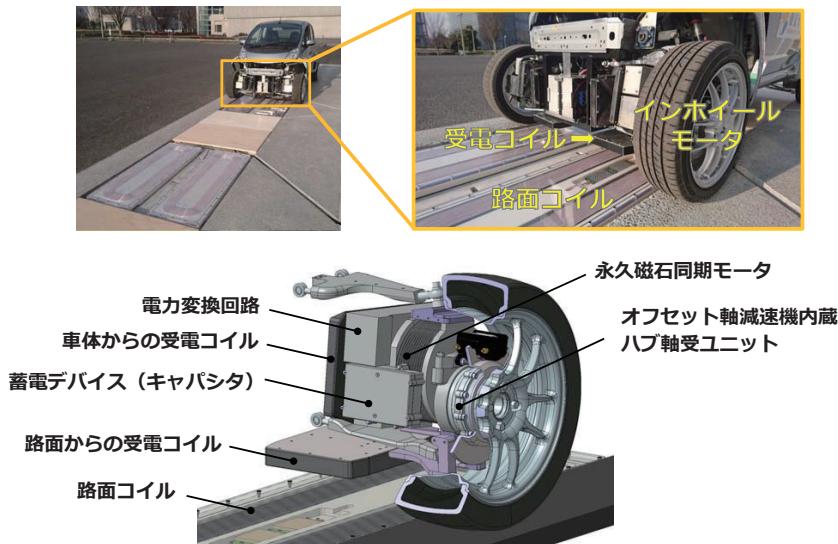
これまでの方法に比べて…

- 車載バッテリではなく、モータに直接給電するので高効率
- 路面との距離が変わらないので理想的
- これだけでクルマの走行に必要な機能が揃う

走行中給電なら
車載バッテリを
減らすことが可能！



5.5 開発したワイヤレスインホイールモータ



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

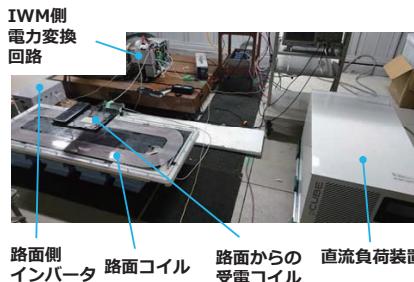
27 / 41

[Fujimoto, et.al EVS31&EVTeC '18]

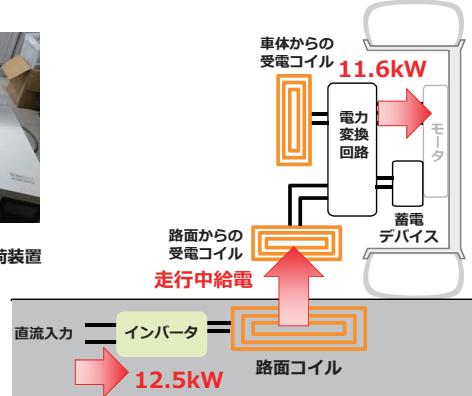
5.7 効率測定実験結果

変換回路を含めた総合効率で**92.37%**を達成！

路面側インバータへの直流入力が12.5kW
車輪側で85kHzから直流へ変換した後の出力が11.6kW
(いわゆるDC-to-DC効率を評価)

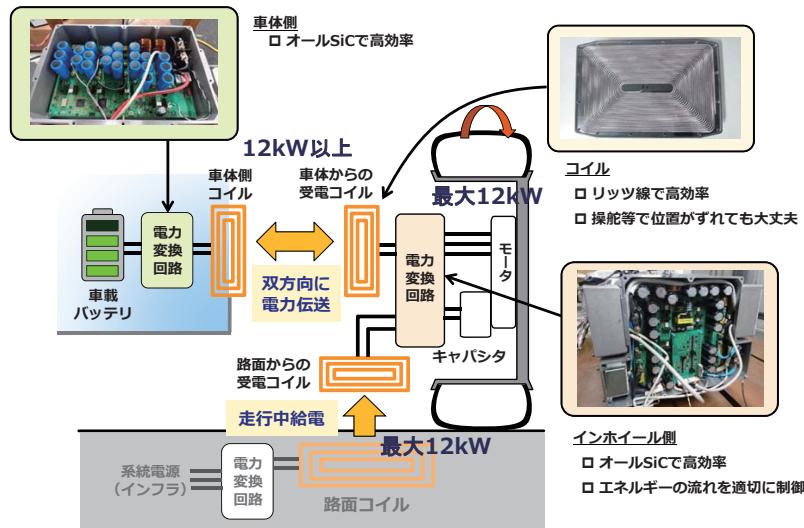


ベンチ試験装置
(走行試験では困難な緻密な測定を実施)
※一定の負荷電力を与えるため直流負荷装置を使用
※各電力はパワーメータで測定



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

5.6 電力変換回路の構成



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

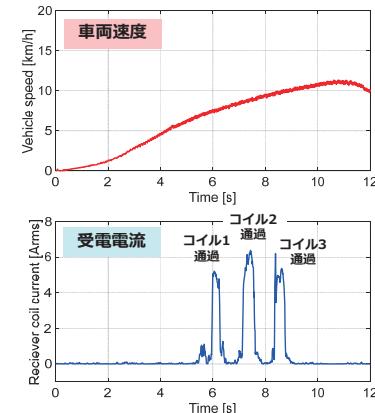
28 / 41

5.8 走行中給電の実験結果

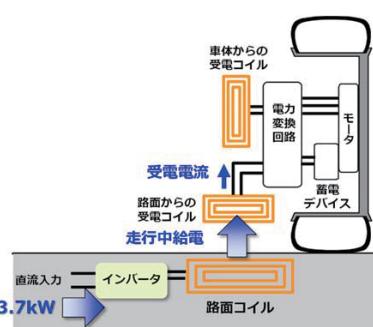


走行中給電実験

- 約3.7kWの電力を送電
- 3つのコイルから電力を受電して走行



※ 受電電流の電流センサが未校正のため受電電力は示しておりません



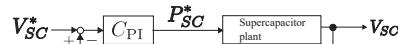
Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

30 / 41

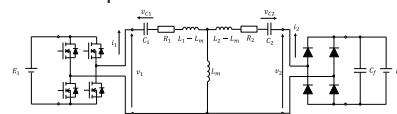
5.9 ワイヤレスインホイールモータのシミュレーション



制御系設計
MATLAB + Simulink

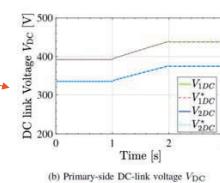
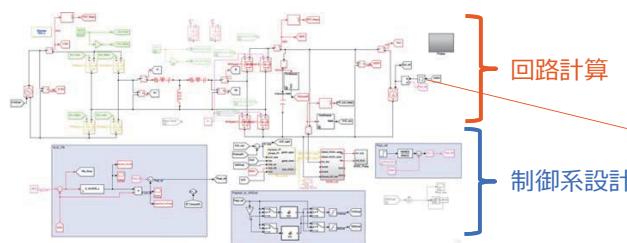


ワイヤレス電力伝送の回路計算
Simscape Electrical Toolbox



両方可能

電気回路の制御系設計と親和性が高い！



Contents

1. Introduction
2. Development and Control of Original EV FPEV2-Kanon
3. Braking Control by Regenerative Torque
4. Driving Comfort Improvement
5. Development of wireless In-wheel motor
6. Range Extension Autonomous Driving
7. Conclusion

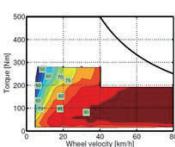
6.1 Range Extension Control System (RECS)



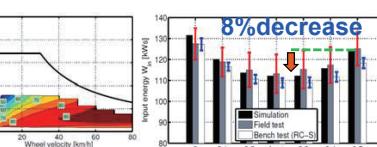
- RECS: Extends cruising range by motion control of vehicle.



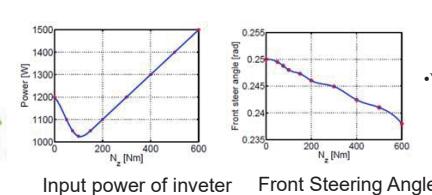
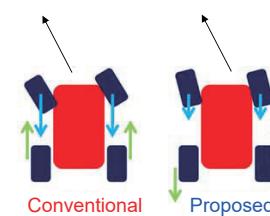
Test Bench
(Ono sokki and NTSEL)



Front motor
Rear motor efficiency
Optimal front and rear driving force distribution
[Fujimoto and Harada TIE 2015] etc.



Input energy W_e [kWh]
Distribution ratio k [-]



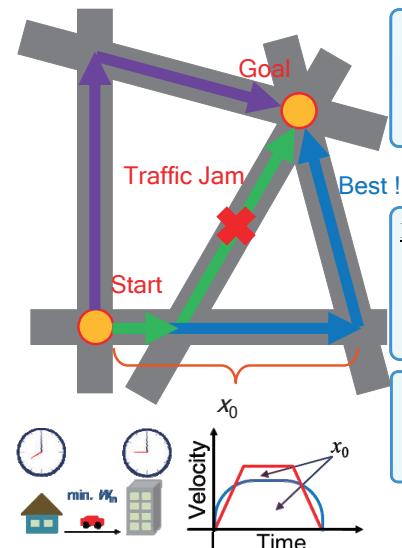
Utilizing right and left torque distribution on curving road
→ Reduction of cornering resistance
[H. Sumiya and H. Fujimoto: EVTeC, 2011] etc.

6.2 Range Extension Autonomous Driving (READ)



Present Navigating System

- System gets some route leading to destination and traffic congestion information
- System proposes us optimal route



Range Extension Autonomous Driving

- System divides a route into some segments
- System generates optimal velocity profile for each segment to minimize consumption energy

Assumption

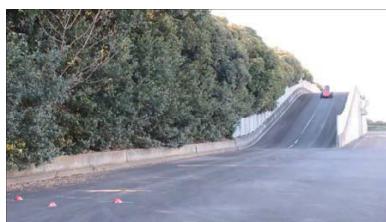
- Forward state (stop point, distance to point ...) can be gotten by ITS, map, and/or camera

Scenarios

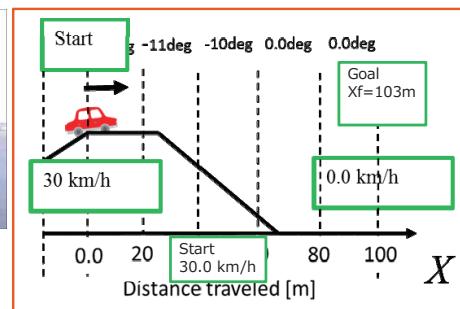
- 1: Down slope road, 2: Traffic signal, 3: Curve

6.3 Range Extension Autonomous Driving @Slope Road

[Yoshida & Fujimoto, IECON'15]



Test road at NTSEL



Aim:

- Minimize total energy consumption (maximize regenerative energy) considering road gradient information.

Assumptions:

- The vehicle starts with a speed of 30 km/h and stops at the goal.
- Road gradient information is available from GPS, ITS spot and so on.

6.4 READ model and velocity trajectory optimization

Objective function and constraint conditions:

$$\text{min. } W_{\text{in}} = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt$$

$$\text{s.t. } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \{ F_{\text{all}} - \text{sgn}(V) F_{\text{DR}}(V, \theta) \} \\ -Mg \sin \theta \\ V(t) \end{bmatrix}$$

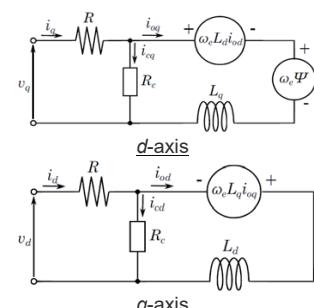
$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \\ F_{\text{all}}(t) \\ k(t) \end{bmatrix}$$

Driving resistance model

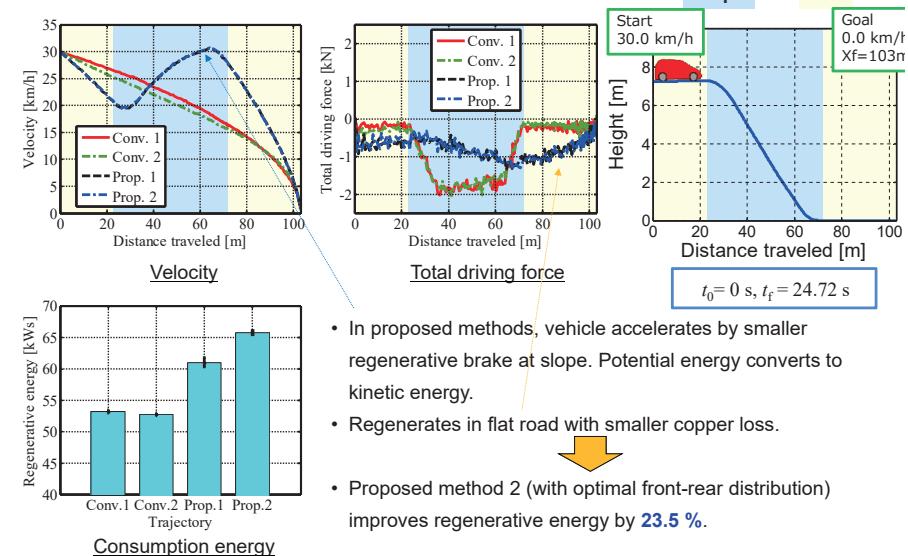
$$F_{\text{DR}}(V, \theta) = \mu_0 M g \cos \theta + b|V| + \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$



Equivalent circuit of PMSM

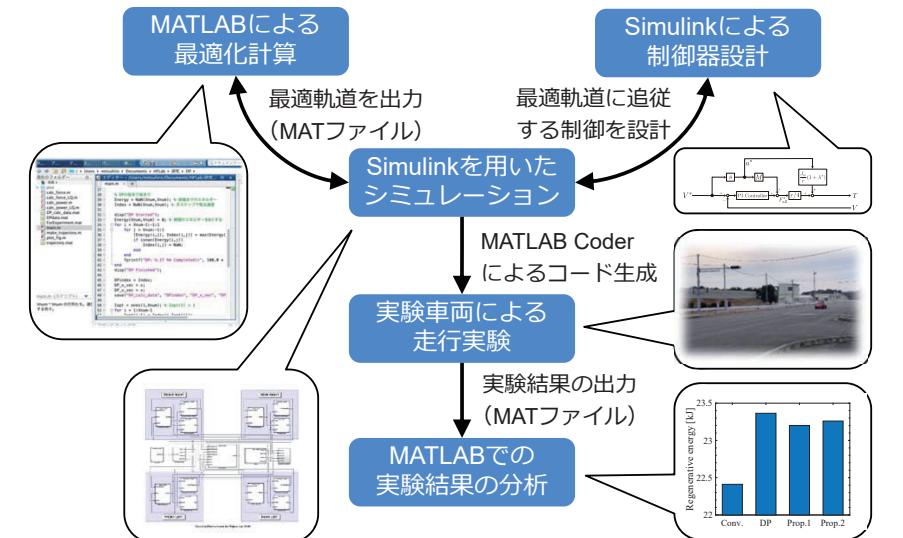
- $F_{\text{all}}(t)$ is optimized by using gradient method to satisfy Euler Lagrange equation

6.5 Experimental Results @Slope Road



- In proposed methods, vehicle accelerates by smaller regenerative brake at slope. Potential energy converts to kinetic energy.
- Regenerates in flat road with smaller copper loss.
- Proposed method 2 (with optimal front-rear distribution) improves regenerative energy by 23.5 %.

6.6 航続距離延長自動運転へのMATLAB/Simulinkの活用



7. Conclusion

1. Control technologies of IWM-EV are introduced to enhance safety, driving comfort, and cruising range.
2. Wireless IWM are developed to eliminate all cables of motors.
3. Developed technologies are applicable not only to Battery EVs but also to (Plug-in) hybrid vehicles and FCEVs.



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

39 / 41



8. Acknowledgements

National foundations: JSPS, NEDO, JST

Industrial collaborators:

Toyota, Nissan, Honda, Mitsubishi motors, Mazda, Denso
Toyo denki seizo, NSK, Nikon, DMG Moriseiki, Panasonic, Hitachi
JTEKT, Yaskawa, Meiden, NiDEC, Ono Sokki

Governmental institutes: JAXA, NTSEL, JARI

Special thanks: Prof. Y. Hori (UTokyo), Prof. A. Kawamura (YNU), Prof. B. Yao (Purdue), Prof. Imura (UTokyo), Prof. Oh (DGIST), Dr. Sakata, Dr. Saiki, Dr. Shiraishi, Dr. Zhu, Dr. Nam, Dr. Nguyen, Dr. Wang, Dr. Miyajima, Dr. Gunji, Dr. Sato, Dr. Kanematsu, Dr. Ohnishi, Dr. Hata, Dr. Yamada, Dr. Yazaki, and all former and current students in my laboratory.



Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

41 / 41



おまけ：東京大学電気系学科でのMATLAB活用



2019年～キャンパスライセンス導入！！

- ① 初年次ゼミ（教養学部1年生向け）
「モーションコントロール入門—ロボットや車両を上手に動かす科学」
- ② 制御工学第一（電気系学科3年生向け）
2回のMATLAB演習、120名以上受講
- ③ 前期実験（電気系学科3年生向け）
MATLABによるデータ処理、シミュレーション（未知の回路のシステム同定）
- ④ 後期実験（電気系学科3年生向け）
「初年次ゼミ」のための実験教材
「制御系設計と運動制御」
ロボットアームのシステム同定と制御系設計（PID制御器と外乱オブザーバ設計）



①の授業風景

教養学部1年生に、制御工学とは何かを教えています
①, ④は今までOctaveを使っていましたが、
2019年からはMATLABへ！

Hori & Fujimoto Laboratory, The University of Tokyo

40 / 41

