

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360098

研究課題名（和文）安全・安心・快適を実現する幼児同乗用インテリジェント自転車に関する研究

研究課題名（英文）Intelligent Electrically-Assisted Bicycle for Children Riding with Safety, Ease and Comfort

研究代表者

岩瀬 将美 (IWASE MASAMI)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：50339074

研究成果の概要（和文）：幼児を同乗させた場合に自転車動特性が変化することによって生じるふらつきや不安定性に対処し，安全・安心・快適な幼児同乗用インテリジェント自転車の開発を行った．幼児同乗にハンドル動特性変化を補償するステアリング補助機構を開発し，ハンドル特性の回復を図った．推進力アシストアルゴリズムを改善しペダル踏力変動に起因する自転車速度揺動の低減化を図った．この結果，幼児同乗走行時においても最大で40%のふらつき減少に成功した．

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a safe, ease and comfortable electrically-assisted intelligent bicycle on which two children can ride with an adult. A steering assist system for such a bicycle is developed to recover the original dynamics of the handle bars. A new prospective assist torque generator can reduce the fluctuation caused by the variation of pedal-biking torque. The integrated assist system for those bicycles can improve stability about 40%.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2011年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2012年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：Safe Manual Control, パワーアシスト, パワーステアリング, マンーマシンインタフェース, 幼児同乗用自転車, 車両安定化, 運動制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 平成21年に道路交通法の一部が改正され，各都道府県ではJIS, SG, BAA規格を満たす幼児同乗用自転車の開発を条件に，自転車による大人1名子供2名の幼児同乗走行が可能となった．各メーカーは要件を満足する専用自転車の開発をすすめ，幼児同乗用自転車が市場に広く普及することとなった．

(2) しかしながら，研究代表者らは先行研究として，現在制定されている幼児同乗用自転車を満たすべき要件だけでは安全性への配慮が不十分であることを示した．それは，幼児の同乗の仕方によって自転車の運動特性（動特性）が変化し，ふらつきやすくなることが考慮されていないことに起因していた．

(3) 図1は(A)幼児同乗なし，(B)幼児前部座

席着座時，(C)幼児後部座席着座時，(D)幼児2名前後座席着座時に，自転車を走行させ左右方向への揺れ（ロール角揺動）の分散を指数化した結果である。この結果は，幼児を1名同乗させる場合に後部座席に着座させると自転車がふらつきやすくなること示されている（幼児非同乗時の約3倍）。したがって，幼児は前部座席に着座させることが望ましい。

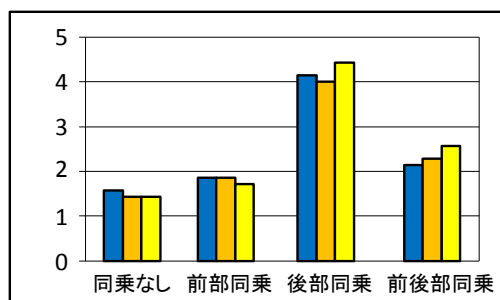


図1：幼児の同乗位置による自転車ふらつき指数

(4) 一方，バッテリーに蓄積された電気エネルギーを利用することで，ペダル推進力を補助する電動アシスト自転車が登場し，平成18年に国内で23万6千台であったものが4年後の平成22年には33万6千台と急速な勢いで普及しつつある。

(5) (1)～(4)の背景のもと，電気エネルギーを推進力補助のみならず，自転車ステアリング補助や自転車姿勢制御へ用いることによって，幼児同乗時による自転車運動特性の変化を考慮したインテリジェントな電動アシスト自転車開発のための環境や背景が十分に整ってきたと捉えた。

2. 研究の目的

(1) 本研究は，1. に述べた背景のもと，電動アシスト自転車の普及率が向上していることに着目し，電気エネルギーを推進力補助のみならず，自転車操作アシストや自転車姿勢制御にも用いることで，自転車の動特性を状況に応じて好ましく変化させ，安全・安心・快適な幼児同乗用自転車を研究開発することを目的とした。

(2) 研究目的を実現するために，以下の研究課題を設定した。①幼児同乗時における自転車の動特性解析，②電動力を用いた推進力・ステアリング・複合アシスト機構の開発，③操縦者の意図を検知するセンシング系の開発，④操縦者をコントローラと見なしたパフォーマンス解析，⑤幼児同乗時における自転車の安全性，快適性を改善する制御系設計。

(3) 研究課題を解決し，統合することにより，

①電動力を用いた推進トルク・ステアリング複合アシスト機構，②自転車動的シミュレータ装置，といった新たなシステムを構築し，最終的に③幼児同乗用インテリジェント自転車の実現を図った。

3. 研究の方法

本研究にあたり，研究全般は研究代表者である岩瀬が担当し，ステアリングアシスト機構開発を研究分担者の貞弘が担当した。研究室に所属する大学院生らの協力のもと実機開発や実験を実施してきた。理論構築にあたり国外の当該分野の研究者らとセミナーなどを通して意見交換を行ってきた。研究は以下の3つのステップを，平成22年～24年の3カ年に割り当て推進した。

(1) 平成22年度では，幼児同乗用インテリジェント自転車を開発するための基礎的な研究として，自転車特性と自転車ハンドル特性を模擬する動的シミュレータの開発(図2)を行った。このシミュレータ装置を用いて，自転車姿勢制御やハンドルアシスト方式の理論的な検討を行った。

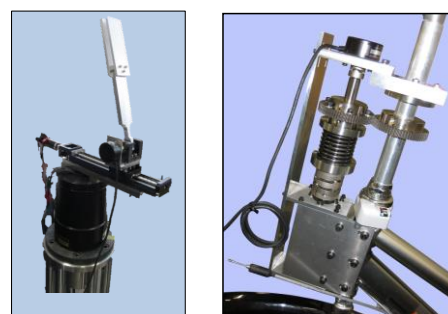


図2：動的自転車シミュレータ（左）ハンドル動特性シミュレータ（右）

(2) 平成23年度では，電動力を用いた推進トルク・ステアリング複合アシスト機構を開発し，幼児同乗用自転車専用アシスト装置開発のための実践的なプロトタイプを構築した。このプロトタイプを試験的に自転車に搭載することで，モデリング，制御アルゴリズム等の検証を行った。

(3) 平成24年度では，(1)～(2)の結果を踏まえ，図3に示す幼児同乗用インテリジェント自転車の開発を行った。また，これに平行して自転車前輪部に慣性回転体を取り付けることによるステアリング補助機構の試験的開発も行った。これは，ここまでの研究成果から，特に低速時での積極的な安全性確保に留意する必要性を再認識し，今後のさらなる研究発展をにらみ，広く一般に知られた慣性回転体による機械的な安定化を行う装置を前輪部に取り付けたものである(図4)。よ

く知られているが現実には利用されていないこの種の装置の問題点が、慣性の増加による操作性の悪化ではないかと考え、ここまでに研究してきたパワーステアリング装置と組み合わせることにより低速での安定化を行いつつ、操作性を維持した自転車の実現性を評価実験により確認した。

これらの開発した電動アシスト自転車を用いて、幼児の代わりに重りを前部座席、後部座席、前後部座席に乗せた場合のふらつき度合いを計測するなど実験的検証によって有効性の確認を行った。

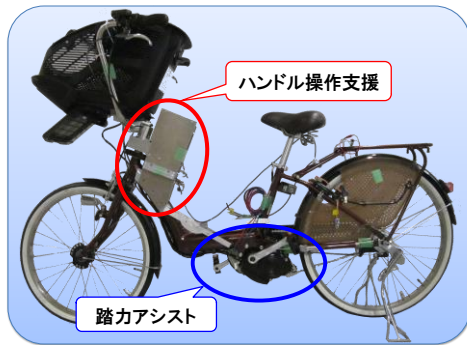


図3：開発した幼児同乗用インテリジェント自転車



図4：開発したステアリングを補助する機械的姿勢安定化装置付自転車

4. 研究成果

本研究の成果は次の3つにまとめられる。

(1) 自転車動的シミュレータの開発とアシスト制御理論の構築。幼児同乗用インテリジェント自転車開発には自転車の状況に応じて適切にアシストを行う機構の開発とその制御アルゴリズムが必要である。そのため、図2に示す自転車全体の動特性を模擬する倒立振り子型シミュレータ(図2左)と、自転車ハンドル動特性を模擬するハンドルシミュレータ(図2右)を開発した。

このシミュレータを用いて自転車姿勢制御アルゴリズムやハンドル動特性回復アルゴリズムなど制御系設計を行った。これにより、①走行中の自転車動特性を反映する自転車動的モデルの導出(学会発表⑦)、②走行

中の自転車姿勢安定化法とその基礎となる制御アルゴリズム理論(学会発表②④⑤⑩)、③幼児同乗時のハンドル動特性を反映するハンドルモデルの導出(学会発表⑭)、④ハンドル動特性を回復する基礎的制御アルゴリズム(学会発表⑫)、が構築された。

(2) 電動力を用いた推進トルク・ステアリング複合アシスト機構。図3の幼児同乗用自転車へ電動パワーステアリング機構を搭載し、もともと備わっているペダルアシスト部の制御アルゴリズムを改良することによって複合アシスト機構を開発した。開発したパワーステアリング機構は図4である。このパワーステアリング機構はインダストリーネットワーク(株)との協力のもとで開発した。

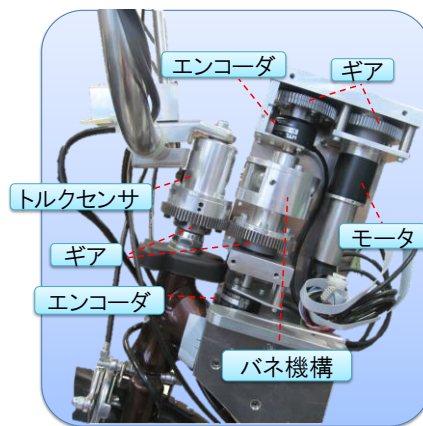


図4：幼児同乗用自転車の電動パワーステアリング機構

幼児を前部座席に乗せた場合、操作者はハンドルが重たく感じられハンドルの急な操作や細かい操作がしづらくなる現象が生じる。これは、図5のボード線図が示すように、ハンドルに加える操舵力に対するハンドル角変化が小さくなる(ゲインが低下)ことに起因する。そこで、図4の電動パワーステアリング機構が操作者の操舵トルクを考慮しながら適切な補助トルクを発生することによって、操作者が大きな力を入れずともハンドル操作が可能となる制御アルゴリズムを実装した。この制御アルゴリズムは外乱オブザーバ(図6)を利用している。

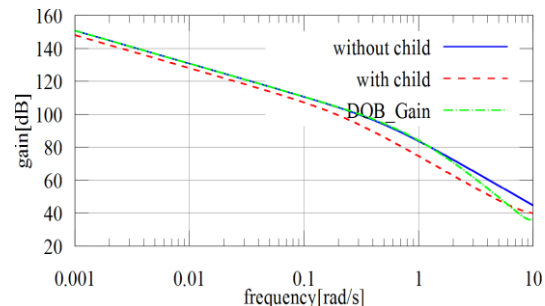


図5：操舵力からハンドル角までのボード線図

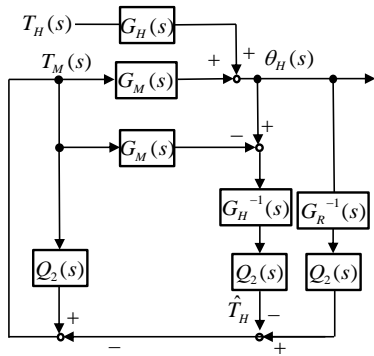


図 6: 外乱オブザーバによるハンドルアシスト制御

開発したステアリングアシスト機構の有効性を、幼児同乗時のハンドルトルクを計測することにより実験検証した (学会発表⑥). 図 7 は電動パワーステアリングによる補助がない場合, 図 8 は補助がある場合である. $\pm 0.16\text{Nm}$ のラインは 電動パワーステアリング補助のもとで操作者が加えた最大トルクである. これより, 開発したパワーステアリング機構により少ない操舵トルクでハンドル操作が可能となっていることがわかる. すなわち, 幼児が同乗した場合でもハンドル操作が軽く行われることを示している.

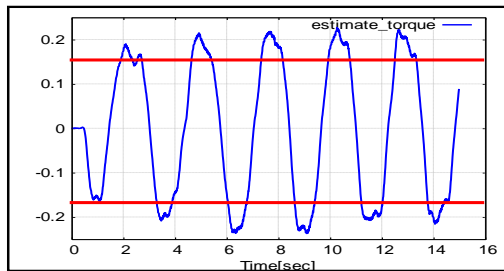


図 7: 操舵トルク (パワーステアリング補助なし)

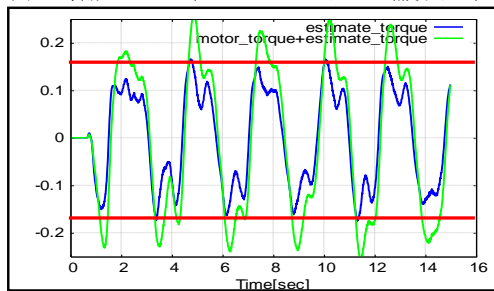


図 8: 操舵トルク (パワーステアリング補助あり)

自転車推進するペダリング補助機構として, 従来のアシストアルゴリズムを改良した. 図 9 はペダルをこぐことによって生じるペダルトルクとそれに対する自転車の走行速度変動を表す. ペダルの上下死点ではトルクを発生することができず自転車速度が低下する. 登坂時や発進時にその速度変動が大きく, 速度が低下すると自転車がふらつきやすくなり転倒の危険性が増す.

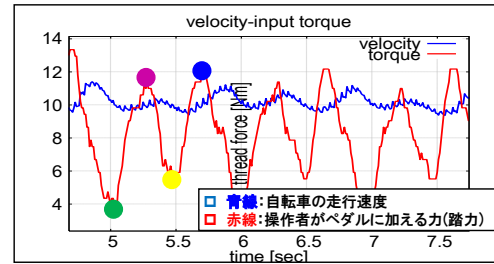


図 9: ペダルトルクと走行速度変動

ペダルトルクと走行速度変動がペダル角度に依存することから, ペダル角度周期の繰り返し制御系 (図 10) を構成し, ペダルをこぎづらいポイントでアシストモータがより多くのトルクを発生させるアルゴリズムを開発した (学会発表⑧⑨⑪⑬).

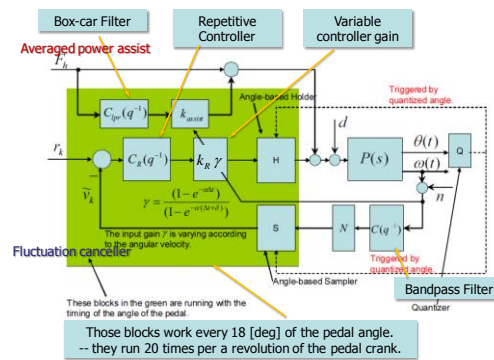
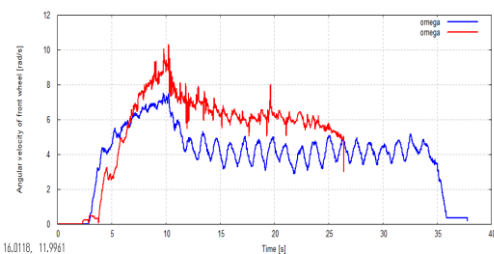


図 10: ペダル周期繰り返し制御系

この結果を図 11 に示す. 提案する真アシスト方式により自転車走行速度の変動幅が減少し, 標準偏差ベースで検証したところ従来方式より約 20%速度変動を抑えられた. ペダル角度に依存する制御系アルゴリズムを一般化したルベーフサンプリング制御なる理論に発展させた (雑誌論文①, ②)



	Standard Deviation	Mean
No Repetitive Controller	0.466	3.84
Repetitive Controller	0.385	4.90

20% improved!

図 11: 新アシスト方式による改善

慣性回転体による機械的な安定化を行う装置を前輪部に取り付け、パワーステアリング装置により操作性を補う自転車装置(図4)を開発し、スラローム走行時の車体ロール角変動を計測することでふらつき度合いの評価を実施した(図12)。図に示す通り慣性回転体・パワステともに作動する場合は他と比べふらつきが少なくなっており、装置の有効性が示せた(学会発表①③)。

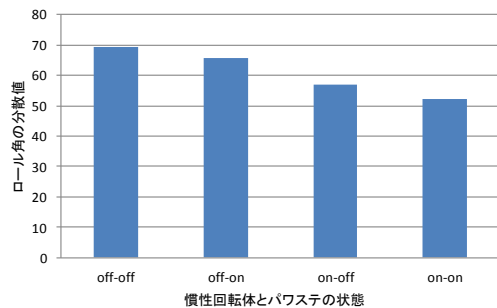


図12: 慣性回転体によるふらつきの変化 (車体ロールの角変動分散値)

(3) (1)~(2)の成果を統合し、開発した幼児同乗用インテリジェント自転車を図3に示す。個々の要素技術は(1)~(2)に述べており、これらをインテグレーションした結果が図3である。この幼児同乗用自転車へ幼児に見立てた重りを搭載し、直進、旋回、スラローム走行時の車体ロール角変動(分散)を計測することでふらつき度合いの評価を実施した。

結果を図13に示す。開発したアシスト機能がない場合と働いた場合とで比較検討を行った。操縦者によって定量的には個体差が見られるものの、全ての操縦者のケースに対してアシスト機能を働かせた場合にふらつきが改善された。特にアシスト機能がない場合にふらつきが大きい操縦者ほどアシスト機能を働かせた場合のふらつき減少が大きく、最大で約40%も改善された。この結果は、母親など力の弱い女性が幼児同乗用自転車に乗る傾向が高いことから、本アシスト機構が幼児同乗用自転車の安全性改善に貢献し、安心して快適な幼児同乗走行を実現することが期待できる。

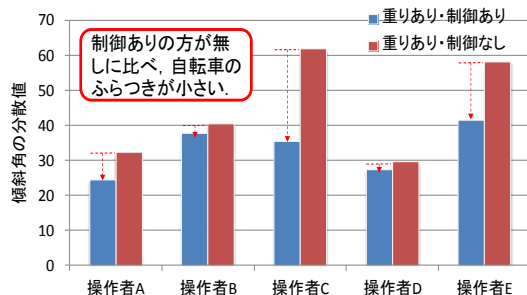


図13: アシスト機能によるふらつき改善 (車体ロール角変動分散値)

(4) 幼児同乗時の自転車動特性変化に伴う危険性の増加に対して新聞やテレビによるメディアを通じた啓蒙活動(その他②, ③)も行った。メディアを通して、幼児同乗時自転車に潜む危険性や幼児を同乗させる場合には後部座席よりも前部座席に乗せたほうがふらつきが少なくなることを広く公表することができた。

また、自転車のインテリジェント化や開発したアシスト装置は新聞(①, ④)に取り上げられ、メーカーなど産学連携のきっかけをつくることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① H. Ohsaki, M. Iwase, and S. Hatakeyama, Rotational Motion Control Design for Cart-Pendulum System with Lebesgue Sampling, J. of Mechanical Engineering and Automation, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2012, 45-52, DOI:10.5923/j.me.20120203.02
- ②大崎 大, 岩瀬 将美, 畠山 省四朗, ルベグサンプリングを用いた台車型倒立振子の回転運動制御, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 133, No. 1, 2012, 177-184, DOI:10.1541/ieejieiss.133.177

[学会発表] (計14件)

- ①永井 凜太郎, 金原 耕太, 児玉 悠, 貞弘 晃宜, 岩瀬 将美, パワーステアリングと回転円板を用いた自転車の姿勢安定化装置の実験的検証, 第55回自動制御連合講演会, 京都大学, 2012年11月18日, 1352-1355
- ②若槻 勇太郎, 浪川 大貴, 佐藤 直柔, 岩瀬 将美, 自転車の旋回走行を模擬する倒立振子モデルの姿勢安定化制御, 第55回自動制御連合講演会, 京都大学, 2012年11月18日, 1348-1351
- ③大野 聖志朗, 岩佐 直樹, 松尾 威志, 貞弘 晃宜, 岩瀬 将美, 非線形自転車モデルの構築とその実験的検証, 第55回自動制御連合講演会, 京都大学, 2012年11月17日, 80-84
- ④N. Soma, D. Namikawa, H. Shinbara and M. Iwase, Pendulum-based Simulator for Bicycle Motion Analysis and Control, ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference & JSME 2012 11th Motion and Vibration Conf., October 19, 2012, Hilton Fort Lauderdale Marina Hotel, FL, USA, DSCC2012-MOVIC2012 -8794
- ⑤K. Yoshida, M. Iwase and H. Ohsaki, Optimality Recover of Feedback Control System based on Discrete-time State

Dependent Riccati Equation, 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, October 3, 2012, Dubrovnik Palace Hotel, Croatia, 463-469

- ⑥ S. Matsuzawa, N. Sato and M. Iwase, Control Design of Electrically-Assisted Steering Systems for Bicycles with Child Restraint Seats, American Control Conference 2012, June 28, 2012, Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada, 2749-2754
- ⑦ 相馬 信彦, 新原 啓央, 岩瀬 将美, 幼児同乗用自転車の操作支援を目指した旋回挙動のモデリングと解析, 第54回自動制御連合講演会, 2011年11月20日, 豊橋技術科学大学, 1798-1801
- ⑧ 浪川 大貴, 佐藤 直柔, 岩瀬 将美, 井筒 正義, 電動アシスト自転車の踏力アシスト制御の改良, 第54回自動制御連合講演会, 豊橋技術科学大学, 2011年11月20日, 1802-1805
- ⑨ 大崎 大, 岩瀬 将美, 畠山 省四朗, ルベークサンプリングによる台車型振子の回転運動制御, 第2回プラントモデリングシンポジウム, 2011年10月19日, 上智大学
- ⑩ 大崎 大, 佐藤 直柔, 新原 啓央, 岩瀬 将美, 自転車簡易モデルを用いたSafe Manual Controlによる安定性解析学会, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月13日, 東京工業大学, G100032
- ⑪ H. Ohsaki, M. Iwase and S. Hatekeyama, Rotational motion control design for cart-pendulum system with Lebesgue sampling, American Control Conference 2011, July 1, 2011, San Francisco Hilton on O' Farrell Street, USA, 827-832
- ⑫ 佐藤 直柔, 松澤 俊介, 岩瀬 将美, 幼児同乗自転車用ハンドル支援システムの制御系設計-Model-Following制御と外乱オブザーバに基づいた制御系の検討-, 第12回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2011年6月30日, メルパルク長野, No. 11-6, 380-385
- ⑬ 佐藤 直柔, 松澤 俊介, 岩瀬 将美, 貞弘 晃宜, 畠山 省四朗, 幼児同乗用自転車の速度変化に伴う安定性の解析と踏力トルクのアシスト手法, 第53回自動制御連合講演会, 2010年11月4日, 高知城ホール, 36-39
- ⑭ 松澤 俊介, 柴田 隆弘, 佐藤 直柔, 岩瀬 将美, 貞弘 晃宜, 畠山 省四朗, 幼児同乗用自転車のハンドル操作支援を行うパワーステアリングシステム, 日本機械学会2010年度年次大会, 2010年9月7日, 名古屋工業大学, 309-310

〔その他〕(計4件)

報道関係情報

- ① 「幼児同乗用自転車の研究」, あだち広報

(2012年4月25日付)

- ② NHK 「あさイチ」-自転車の安定性に関する実験-(2012年2月20日放映)
- ③ 「3人乗り自転車の仕組みや安全性」, 朝日新聞(科学面)(2011年2月22日付)
- ④ 「自転車むけパワステ」, 日刊工業新聞(2010年8月24日付)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩瀬 将美 (IWASE MASAMI)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号: 50339074

(2) 研究分担者

貞弘 晃宜 (SADAHIRO TERUYOSHI)
佐世保工業高等専門学校・機械工学科・講師
研究者番号: 40424676