

## 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 4 月 5 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560783

研究課題名（和文）高速・高精度姿勢制御のための適応スキュー角ピラミッド型 CMG の研究開発

研究課題名（英文） Study and Development of Adaptive Skew Angle Pyramid-type CMG for Fast and Precise Attitude Control

研究代表者

小島 広久（KOJIMA HIROHISA）

首都大学東京 大学院・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50322350

研究成果の概要（和文）：

適応スキュー角ピラミッド型コントロールモーメントジャイロを新たに提案し、スキュー角駆動機構を有する実験装置を製作した。特異点曲面のスキュー角依存性を解析し、従来角度において内部特異点曲面積が最小になることを発見した。従来のジンバル駆動則を適応スキュー角 CMG 用に拡張し、約 5% の姿勢変更時間の短縮に成功するとともに、オーバーシュート量の減少を達成した。またヌルモーション項を入れることによりスキュー角が姿勢変更終了後に従来角方向へ戻る傾向を与えることに成功し、連続姿勢変更にとって望ましい結果を得た。考案した制御則により、姿勢変更時間が短縮化可能なことを実験装置にて検証した。

研究成果の概要（英文）：

The adaptive-skew pyramid-type CMG system was proposed. The singular surfaces are analyzed and visualized to illustrate how they depend on the skew angle from a viewpoint of null motion for not only the gimbal angle but also the skew angle. It was discovered that when the skew angle is 54.73 deg, the impassable singular surface area is minimum, and the 4H singular surface area is maximum. The steering control laws are presented, and their effectiveness in reduction of settling time and overshoot was numerically shown. The skew angle controlled by the proposed steering law has a tendency to return to the traditional angle after the attitude maneuver. The experimental setup of the adaptive-skew CMG was developed. The effectiveness of the proposed steering law was experimentally studied using the developed experimental setup.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,331,324	420,000	1,751,324
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,331,324	1,020,000	4,351,324

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：コントロールモーメントジャイロ・ジンバル駆動則・特異点回避・スキュー角・ゲインスケジュール・モデル予測制御

## 1. 研究開始当初の背景

Control Moment Gyro(以下 CMG と表記) は角運動量交換型アクチュエータであり, Reaction Wheel(以下 RW と表記)に比べ高出力である. 一方, CMG は所望の方向にトルクが発生できないジンバル角の組み合わせという特異点の問題があり, 特異点の計算と回避は, 高速姿勢変更・高精度追従制御を CMG で実現する上で重要な課題である.

そこで, 特異点回避の制御則が考えられている. 特異点ロバスト駆動則は特異点近傍に来たときに正弦関数でエラートルク指令を出し, 意図的に目標指令トルクとは異なるトルクを発生させて特異点を回避する方法であるが, 回避方向の予測ができない問題がある. 可変速度 CMG は CMG のホイール速度を変化させて特異点回避を行う CMG と RW の両面を持つシステムであるが, 制御則が複雑であり, また RW 機能を極力使用しない方が得策であるという否定的な結論が出ている. NULL モーションにより特異点に遭遇しないジンバル位置へ事前に変更する方法が提案されているが, 経路探索に数値シミュレーションを用いているため計算量が多い問題がある. CMG を用いたときの到達可能な姿勢目標についての研究も行われているが, 1 個の CMG システムに対するものであり, 複数の CMG に対するものでなく実用向きでない. また, 特異曲面は事前に計算可能であるので, データ化して回避に利用する方法が示されたが, 実装検証された例はない.

これら従来法の問題点を鑑み, 今までに以下の 2 つの研究を実施してきた.

(1) 特異点曲面を三角パッチで事前に近似データ化し, 特異点曲面を回避するモデル予測制御法を提案し, 姿勢変更高速化の効果を示した.

(2) ピラミッド型 CMG(図 1) のスキュー角を変化させ, 姿勢変更軸まわりに発生できる角運動量のモーメント・エンベロップを大きくし, 結果的に発生トルクを大きくしようとする『適応スキュー角ピラミッド型 CMG』を提案し, 姿勢変更時間の短縮可能性を数値計算で示した.

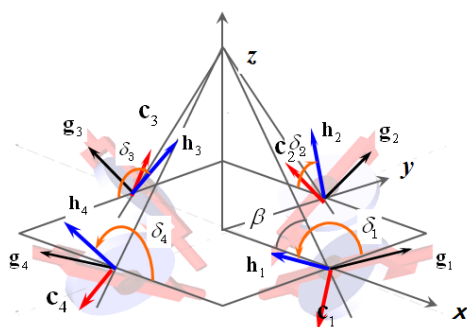


図 1: ピラミッド型 CMG

しかし, 内部特異点曲面を三角パッチ近似して記録したデータは依然大きいので, さらにスキュー角を変数にして近似データを単純に記録する方法では, 計算機資源が限られている衛星への適用は難しい. また, 発生トルクが希望方向に大きくなるようスキュー角を姿勢変更中に動的に変更させる場合, 内部特異点形状が動的に変化するため, 内部特異点曲面の時間変化を考慮しないモデル予測制御のままだと, 予測がはずれ内部特異点曲面に衝突する可能性がある. その結果, 高トルク発生および高精度トルク発生がなくなる恐れがある.

この問題に対し, 内部特異点曲面を効率良く少ない情報で記録し, かつスキュー角との関係を陽に表す関数の形で保持する方法を明らかにすれば, スキュー角変更に伴う内部特異点曲面状態が分かるので, 特異点曲面の回避が効率よく行えるようになり, かつ姿勢変更希望軸まわりに大きなトルクを発生できるようになり, 従来システムに比べ性能向上が期待できる.

## 2. 研究の目的

小型でありながら所望の方向への発生トルクを従来よりも増大化させ, 高速姿勢変更を可能とする『適応スキュー角ピラミッド型 Control Moment Gyro(CMG)』と呼ぶ新しいアクチュエータシステムを提案し, この CMG システムに対して, 所望の方向にトルクが発生できないジンバル角状態である CMG 特有の問題である特異点を簡便で効率良く回避するジンバル駆動制御則を開発することで, 高速・高精度姿勢追従制御を可能とする CMG システムを実現することを目的とする.

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために, 以下の方法で研究を行った.

### (1) 特異点解析

内部特異点曲面データの近似についてスキュー角を静的に変更した場合における特異点曲面の変化を解析, 曲面データの近似化の必要性の有無を検討する.

特異点面積のスキュー角依存性についてスキュー角が変化する場合に対して特異点曲面の存在領域・面積を解析する.

双曲型・楕円型特異点境界線の計算幾何学的境界線(交線)計算法を応用し, 双曲型・楕円型特異点の境界線を計算し, モデル予測制御に活用できるようにデータベース化する方法を検討する.

スキュー角変更も考慮した特異点解析

### (2) ジンバル駆動則の考案

従来法からの拡張駆動則

スキュー角をジンバル角の1つと見なし、従来のジンバル駆動則を拡張した場合における効果を数値計算にて検証する。特異点解析に基づいた駆動則の研究開発、適応スキュー角の特異点解析に基づいたジンバル駆動則の実装方法を検討する。

### (3) 実験装置の開発

4個のシングルジンバルCMGのスキュー角を同時に同じ角度だけ1つのアクチュエータで変更するための機構を考案、装置として製作を行い、スキュー角変更機能を実現できることを確認する。また、スキュー角変更に伴う重心位置の大幅な変化がないことを確認する。

### (4) 駆動則の実験検証

(3)で開発した実験装置を用い、(2)で検討したジンバル駆動則の有効性を実験検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 特異点解析について

内部特異点曲面データの近似について、近似する以前に解析解を得る方法について検討・文献調査を実施した。その結果、2つのジンバル角から特異点となる残りのジンバル角の組み合わせを決定する次の関数が過去に得られていることが判明し、スキュー角を静的に動かす場合は近似を行う必要がないことが分かった。

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{-2(c\beta)^2 - c\beta \tan \delta_3 + c\beta \tan \delta_1}{\tan \delta_1 + \tan \delta_3} \right)$$

$$\delta_4 = \tan^{-1} \left( \frac{-2(c\beta)^2 - c\beta \tan \delta_1 + c\beta \tan \delta_3}{\tan \delta_1 + \tan \delta_3} \right)$$

この関数はスキュー角を含んだ関数であるので、スキュー角を変更したときに、内部特異点を構成するジンバル角の組み合わせがどのように変化するかをジンバル角の3次元曲面(図2)として表現できるようになった。また、内部特異点曲面は各CMGの取り付け方向に関連して対称であり、この性質を利用してデータ化する際に特異点曲面情報を4分の1に減らすことができた。

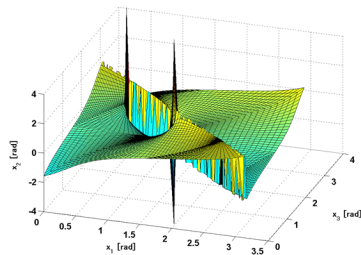


図2：特異点ジンバル角組合せ曲面

特異点面積のスキュー角依存性についてスキュー角を変数として変化させながら、固定スキュー角CMGとして楕円型特異点の存在領域、楕円型特異ジンバル角の領域を計算し、視覚化した(図3)。また、特異点曲面の表面積を計算した(図4)。その結果、スキュー角に応じて、局所的に楕円型特異点曲面の存在領域が大きく変化すること、ならびにスキュー角が従来角度(54.73度)のときに、楕円型特異点曲面の表面積が最小であり、4H特異点曲面の表面積が最大になることが分かった(図4)。

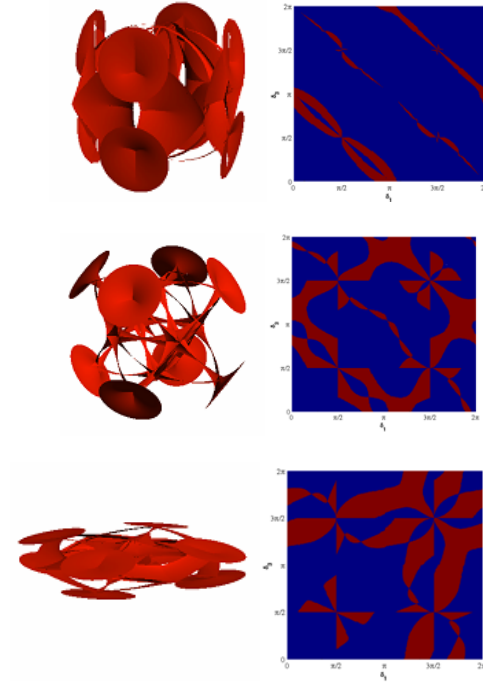


図3 スキュー角に応じた楕円型特異点曲面(赤)(上から順にスキュー角:80度, 54.73度, 10度)

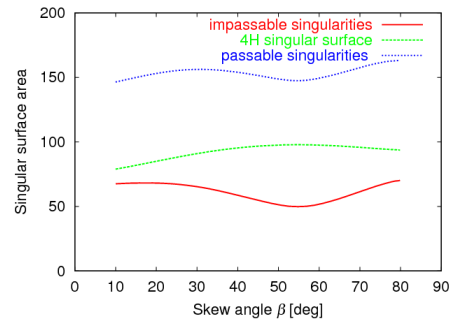


図4 スキュー角に応じた特異点曲面の表面積

### 双曲型・楕円型特異点境界線の計算

双曲型と楕円型特異点の境界線は、ガウス曲率がゼロになる線、すなわち放物型に該当する。ガウス曲率は曲面の第1, 第2基本量を用いて次式で与えられる。

$$K = (LN - M^2) / (EG - F^2)$$

この値がゼロになる線を求めることになる。単純にニュートン法などにより求めると、境界線が枝分かれ・接近している箇所では精度良く求めることができない。そこで幾何学的交線追跡法を利用することにした。これにより、線が枝分かれしている箇所であっても精度良く求めることが可能となった(図5)。また得られた境界線は、図3に示した境界線と等しい物であることが確認できた。

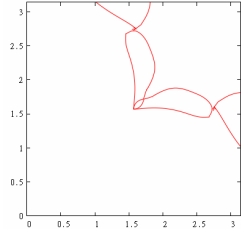


図5 双曲型・楕円型特異点境界線の一部

#### スキュー角変更も考慮した特異点解析

スキュー角が可変の場合に対する最大包絡特異点曲面は、個々のスキュー角に対応した飽和特異点曲面すべてに接する包絡面である(図6左側)。このことから、包絡特異点曲面の式をスキュー角で偏分し、元の包絡特異点曲面式と連立し、スキュー角を消去することで、適応スキュー角ピラミッドCMGの真の最大包絡特異点曲面のx-z断面での次の解析式(およびそれを図示した図6右)を得ることが出来た。なお、このx-z断面上の解析解の一部は2CMGと呼ばれるスキュー角が90度のときの形態と同じものであることも判明した。

$$H_z = \pm \left( 2 - \frac{H_x^2}{8} \right), |H_x| \geq 2$$

$$H_x = \pm 2, |H_z| \leq 2$$

$$H_x^2 + (H_z \pm 2)^2 = 4, |H_z| \geq 2$$

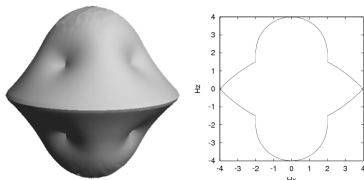


図6 適応スキュー角CMG最大包絡特異点曲面(左:3D図,右:x-z断面図)

#### (2) 駆動則について

従来法からの拡張駆動則についてスキュー角もジンバルの1つとして扱う駆動

則を従来のジンバル駆動則(GSR法)から次元を拡張して考え、数値シミュレーションにて有効性を検討した。

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = WQ^T(QWQ^T + \lambda E)^{-1}(\dot{h}/h_0) + \left[ I_5 - \tilde{W}Q^T(Q\tilde{W}Q^T)^{-1}Q \right] \tilde{W}d$$

$$d = -k \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial \kappa}{\partial \delta} \right)^T \\ \left( \frac{\partial \kappa}{\partial \beta} \right)^T \end{bmatrix}, k > 0$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & \lambda & \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & w_2 & \lambda & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & w_3 & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda & w_4 & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda & \lambda & w_5 \end{bmatrix} > 0$$

#### その結果

- (a) 固定スキュー角よりも、平均で5%程度、姿勢変更時間が短縮できること(表1)
  - (b) スルモーション項を含む駆動則の場合に、姿勢変更終了後にスキュー角が従来角度方向へ戻る傾向を有すること(図7)が確認された。さらに、機械的制限近傍でスキュー角を無理な変更でもってトルク発生を行わないようにスキュー角変更に関係する重み行列を2つのシグモイド関数でもってスキュー角に応じて変化させるゲインスケジュール制御を提案し
  - (c) 滑らかなスキュー角変更が可能
  - (d) 姿勢整定時のオーバーシュート量を低減可能
- という良好な結果を得た。

表1 姿勢変更時の時間短縮率

制御方式	整定時間[s]		GSRに対する短縮率(%)
	x軸	z軸	
GSR	75.12	49.90	-
AS-GSR	70.72	47.26	5.57
AS-GSR+LG	71.94	41.14	4.90

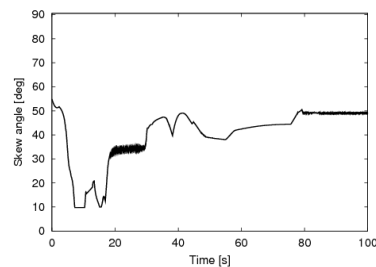


図7 x軸まわりに姿勢変更を行ったときのスキュー角の時間履歴



特異点解析に基づいた駆動則の研究開発  
従来角のスキュー角のときに内部特異点が  
最小であり、スキュー角を変化させること  
により最大包絡面が希望の軸方向(x, z軸)に  
拡張できる事実から、特異点存在領域の  
変化を予測するモデル予測制御に類似した、  
より簡便な以下のようなヒューリスティックな  
駆動則指針(図8)を考えた。

(a)放物型特異点曲面の最大空間内部に  
存在する間は、放物型特異点曲面との距離  
(metric)に応じて、ヌルモーション駆動  
則を適用する。この間、スキュー角は  
54.73度のままにしておく。

(b)放物型特異点曲面の最大空間付近かつ  
楕円型特異点曲面に近づく場合は、GSR  
法を適用し、楕円型特異点曲面を回避する。

(c)放物型特異点曲面の最大空間の外側に  
脱出した後は、スキュー角も含めた形で擬  
似逆行列法を適用する。これにより、スキ  
ュー角を変更しても、楕円型特異点曲面が  
CMG角運動量の外側方向へ存在する状況  
にはならず、CMG角運動量が容易に最大  
包絡面に到達するようになる。

(d)最大包絡面に到達し、かつ指令トルク  
がなお角運動増大方向の場合には、スキ  
ュー角を含めジンバル角を駆動しない。逆  
に指令トルクが角運動量減少方向の場合  
には、最大包絡面から脱出できるよう  
GSR法でもって駆動する。

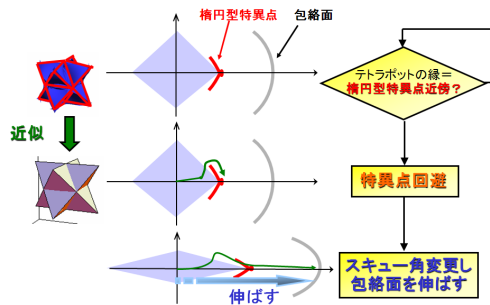


図8 特異点存在領域解析に基づいたヒューリスティックなジンバル駆動則

### (3)実験装置の開発について

4個のシングルジンバルCMGのスキュー角を1個のアクチュエータで同時に駆動するために、4分1周回のギアをCMGに装着し、中央に配したウォームギアによって駆動する機構(図9)を設計製作し、スキュー角が駆動できることを確認した。また、各CMG部にバランスを設置することでスキュー角が変化しても各CMGの重心位置をCMGホイール中央付近に保持できる構成とした。さらに衛星の姿勢運動を模擬するための装置として、球形エアベアリング装置を製作し、その上部に作成した適応スキュー角CMG装置を搭載し、バランスにて重心位置を球形エアベアリング中央付近に調節した。

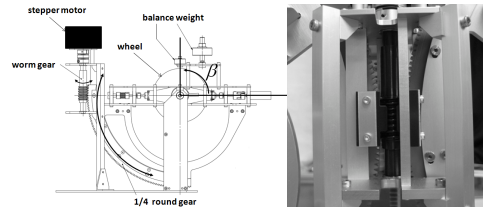
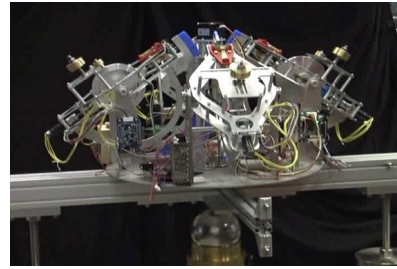


図9 製作した適応スキュー角CMG実験装置

### (4)実験検証について

従来法からの拡張駆動則について  
Z軸回りに180度姿勢変更する実験を実施し、スキュー角固定との整定時間の比較を行った。その結果、約13%の時間短縮が達成できた(表2)。

表2 実験比較(従来法からの拡張駆動則)

	整定時間[s]	短縮率(%)
従来法	39.3	-
AS-CMG	34.0	13.5

### 特異点解析に基づいた駆動則について

製作した実験制御プログラムに、スキュー角を固定した場合のモデル予測制御および特異点解析に基づいて考察したヒューリスティックなジンバル駆動則を実装し、実験を行った。その結果、スキュー角を固定したままのモデル予測制御の場合でも、従来法(疑似逆行列法)に比べ、平均で13%程度の時間短縮が達成できた。また、ヒューリスティックなジンバル駆動則は姿勢変更回転軸によっては、スキュー角固定のモデル予測制御と同等程度以上の時間短縮を得られる場合もあったが、角速度を減衰させる段階でスキュー角が希望よりも小さく(大きく)なる場合があり、姿勢整定に悪影響を及ぼす場合もあることが判明した。これにはスキュー角の可動範囲を考慮したゲインスケジューリングを統合する必要があるが、課題が残った。

### 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 3件)

Kojima, H.: Singularity Visualization and Steering Control Law for Adaptive-skew Pyramid-type CMG, 査読

有, Elsevier, Acta Astronautica, Vol.85, pp.120-137 (2013).

DOI:10.1016/j.actaastro.2012.12.019

Kasai, S., Kojima, H., and Satoh, M.: Spacecraft Attitude Maneuver using Two Single-gimbal Control Moment Gyros, 査読有, Elsevier, Acta Astronautica, Vol.84, pp.88-98 (2013).

DOI:10.1016/j.actaastro.2012.07.035

Takada, K., Kojima, H. and Matsuda, N.: Control Moment Gyro Singularity-Avoidance Steering Control Based on Singular-Surface Cost Function, 査読有, AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.33, No.5, pp.1442-1450(2010).

DOI: 10.2514/1.48381

〔学会発表〕(計 13 件)

小島広久, 山口 慧: 楕円型特異点回避モデル予測駆動制御則開発に向けた CMG 特異点境界線の幾何学的計算, 第 30 回誘導制御シンポジウム, 相模原, 2013 年 5 月 16-17 日

堺 桃子, 小島広久: 高精度終端姿勢制御のための可変速度コントロールモーメントジャイロにおけるスムーズスイッチング駆動則, 日本機械学会 関東支部第 19 期総会講演会, 東京, 2013 年 3 月 15 日

Kojima, H., and Kasai, S.: Gain-scheduled Steering Control Law for Adaptive Skew Pyramid-type CMGs, 15th Australian International Aerospace Congress, Melbourne, 2013 年 2 月 25- 28.

小島広久, 堺 桃子, 佐藤 光紀: ゲインスケジュールド VSCMG 制御による宇宙機姿勢変更, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 大分県, 2012 年 11 月 20-22 日

小島広久, 笠井慎也: 適応スキュー角ピラミッド型 CMG に対するゲインスケジュールドジンバル駆動則, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 17, 18 日

Kasai, S., Kojima, H., Satoh, M. : Spacecraft Attitude Maneuver using Two Single Gimbal Control Moment Gyros, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, Minnesota, 2012 年 8 月 13-16 日.

小島広久, 佐藤光紀: SGCMG2 個による衛星の姿勢制御, 第 43 回航空宇宙学

会年会, 東京, 2012 年 4 月 12, 13 日.  
小島広久: 適応スキューピラミッド型 CMG の特異点解析, 第 54 回自動制御連合講演会, 豊橋, 2011 年 11 月 19-20 日.

Kojima, H., Matsuda, H., and Yamaguchi, S.: Singularity Visualization and Steering Control Law of Adaptive Skew Pyramid Type CMGs, AIAA Guidance, Navigation and Control, Portland, Oregon, 2011 年 8 月 8-11 日.

小島広久: 適応スキューピラミッド型 CMG の特異点解析と視覚化, 第 21 回アストロダイナミクスシンポジウム, 相模原, 2011 年 7 月 25-26 日.

Kojima, H., Matsuda, N. and Yamaguchi, S.: Development of Adaptive Skew Pyramid Type CMGs, 28th ISTS, Naha, Okinawa, 2011 年 6 月 5-12 日.

小島広久, 山口慧, 松田直樹: ピラミッド CMG の特異点ジンバル角組合せの視覚化とジンバル角軌道計画への応用, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 静岡, 2010 年 11 月 17-19 日.

Matsuda, N., and Kojima, H.: Steering Control Law of Adaptive Skew Pyramid Type CMGs for Fast Attitude Maneuvers, MOVIC2010, Tokyo, 2010 年 8 月 17-20 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 広久 (KOJIMA HIROHISA)

首都大学東京 大学院 システムデザイン研究科 教授

研究者番号: 50322350