

## 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24年 6月 5日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360414

研究課題名（和文）自己修復可能な地球・惑星遠隔探査光学センサの研究

研究課題名（英文）Self-Compensation optical sensor for earth and planetary observation

研究代表者

岩崎 晃 (Akira Iwasaki)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：40356530

研究成果の概要（和文）：

本研究は、完全画像を目指してリモートセンシングセンサを高度化するものである。幾何学的な無矛盾な幾何補正により、衛星の姿勢変動を受けている光学センサデータから、地震前後の地盤変動を見出した。また、補償光学系によって光学系の自己修復を行った。光学系の歪み、位置ずれを波面として定式化し、液晶空間光変調器を用いた波面制御と、ミッションに用いる画像センサを利用した波面推定により、画像品質を向上させた。

研究成果の概要（英文）：

Imagery acquired by remote sensing sensors is improved to be ideal quality. Using the geometric relationship, the displacement caused by large earthquakes is detected under the satellite attitude jitter. Adaptive optics makes it possible to correct the optical performance. The optical aberration due to deformation or misalignment of the optical system is formulated as wavefront variation. The LCOS-SLM is used to compensate the wavefront and the wavefront is estimated, which realizes ideal imagery.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：宇宙利用・探査、自律制御

## 1. 研究開始当初の背景

地震などの災害や地球温暖化についての情報を収集し、国民の安全に寄与する地球観測は宇宙利用において大きな役割を期待されている。将来の地球観測は「気候変動・水循環分野及び地球温暖化・炭素循環分野」と「災害分野」の二本柱で進められていくことが「我が国の地球観測における衛星開発計画及びデータ利用の進め方について（宇宙開発

委員会地球観測特別部会)」で示されている。後者では空間分解能を向上させる計画が明らかにされており、これまでの観測では得られなかった微細な情報取得が期待される。また、「宇宙基本法」では災害などの脅威の除去に資するための安定的な観測に関する情報システムならびに宇宙探査等の先端的な宇宙開発利用が謳われている。

一方、「地球観測の推進戦略（総合科学技

術会議)においては、社会インフラとして情報を有効活用するために品質評価・品質管理の強化が求められている。現在、米国のGeoEye、独国のRapidEye、仏国のPleiadesなど高空間分解能の観測衛星を運用する計画、独国のEnMapなど高スペクトル分解能衛星計画が世界各国から打ち出されている。

このように、幾何性能、空間分解能、スペクトル分解能などの性能向上が必須となるに伴い、人工衛星に搭載される観測装置の大型化とそれに伴う波面歪が問題となっている。特にハイパースペクトルセンサでは、空間方向とスペクトル方向でデータ劣化が生じるため、波面歪解消は重要な課題である。従来は画像のボケ(デフォーカス)による点像分布関数の補正のみが考えられてきた。補正には取得した画像データを用いた後処理が行なわれるが、解の一意性が保証されない不適切(gill-posed)問題であり、満足な結果は得られていない。オンボードで光学系を最適に保つことができれば、より高品質の画像を取得できると期待されている。

また、地震前後の光学センサ画像を比較することで一画素以下の分解能で地盤変動が見いだせるため、空間分解能の向上によってサブメートルの変動測定が期待されているが、衛星の姿勢変動などに妨げられている。近年、観測画像そのものを用いることで、衛星の姿勢変動の影響を推定し、幾何学的に無矛盾な衛星データを構築できることが示されている。これは、観測センサ内部の物理的配置を詳細に取りこみ、二次元に投影された衛星画像を三次元空間で処理し、矛盾点の検出に生かすものである。センサの物理配置を動的にすることで、より精度の高いデータ処理が可能となる。

本研究はオンボードで光学系を最適な状態に保ち、理想的な波面を形成することにより「光学系の自己修復」機能を目指すものである。これによって、画像処理だけでは補正が十分でない、コマや非点収差あるいはより高次の収差による画像劣化までもが解消される。また、同時に実現されるフレキシブルな機能を持つ光学系を用いることで、最適なセンサ配置に基づいて幾何学的に無矛盾な画像データの取得が可能となる。これによって、観測画像に発生する諸問題をほとんど解決し、より完全なデータ供給に道を拓くことが可能となる。

## 2. 研究の目的

自己修復可能な光学系を実現するために、以下の3ステップの研究を実施する。図1に示すように、本研究課題の成果を元に、波面修復技術・無矛盾幾何技術を獲得し、最終的にはフーリエ空間(空間周波数領域)においても補償した「完全画像」を取得することを

目的とする。

### (1) 波面制御技術の開発

光学系の歪による像の劣化を、光学系構成要素の歪を直接修復するのではなく、光学系を通過した後の波面を制御することによって補正する。近年開発が進んでいる空間位相変調器を利用し、小型で高精度の制御システムを開発する。従来のカメラで行なわれているオートフォーカスだけでなく、コマや非点収差などのザイデル収差、さらに高次の波面収差の修復を達成する。また、無矛盾幾何技術のためにセンサ構成を最適化する技術を獲得する。

### (2) 波面推定技術の開発

光学系の自己修復のために必要な波面推定技術を開発する。波面センサあるいは観測対象の事前情報を必要とせず、画像センサで得たデータから逆問題を解いて収差パラメータを求めるロバストな手法を開発する。

### (3) 補償光学実験

以上の結果を受けてリモートセンシング実験システムを構築し、波面制御技術と波面推定技術を用いて熱歪などによる光学系の低周波歪を修復する波面修復技術の実験を行う。また、プラットフォームの姿勢変動などによる視線方向の高周波成分を取り除くためにセンサの物理配置を最適化する無矛盾幾何技術の実験を行う。さらに、これらの技術を統合して、より広い周波数変動に対して理想的な画像を取得する実験を行う。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、リモートセンシングセンサの高性能化、小型化のために必要な自己修復可能な光学系の研究を行う。この光学系を実現する基礎技術として、(1)波面制御、(2)波面推定を研究し、これらの成果を統合し、(3)補償光学実験を行う。

### (1) 波面制御

光学系の歪を補正するためには、その歪によって生じた波面収差を、逆位相の波面形成によって打ち消すことができればよい。空間位相変調器を用いて任意の波面を形成する技術を開発する。

#### ① システムの数学モデル構築

光学系、波面収差、空間位相変調器の数学モデルでシステムを表現する。光学系は、望遠鏡としての利用を前提としてアイソプラナチックな系を仮定し、スカラー回折理論に基づきモデル化する。任意の波面 $\Phi$ を、直交多項式であるZernike多項式( $Z_j$ )の和として記述し、収差パラメータ $\{c_j\}$ で収差を表現する。また、空間位相変調器の画素構造を、回

折光学素子として記述する。

数学モデルに基づき、システムの数値シミュレータを構築する。実験によって得られる素子の特性を反映するために、要素の数学モデルを個別に修正することが可能な、汎用的な数値シミュレータとする。

## ② 波面制御方式の開発

空間位相変調器で波面を形成する際、制御可能な位相変調幅と、制御素子の画素幅による制限を受ける。波面の位相が $2\pi$ をこえる際の位相ラッピング、回折効率を最適化する波面形成を考慮した制御手法とする。

自己修復光学系を構築し、波面制御後の通過光の品質測定を行い、アルゴリズムの妥当性を調べる。また、応答速度の評価を行い、システムの運用条件の妥当性を評価する。

## ③ 波面制御性能の評価実験

空間位相変調器を用いて、Zernike 多項式の各項に相当する波面を形成することを目的とした波面制御の基礎実験を行う。Zernike 多項式の低次の多項式は、デフォーカス ( $Z_5$ )、コマ ( $Z_8, Z_9$ )、非点収差 ( $Z_4, Z_6$ ) 等に対応しており、高次多項式まで考慮することにより任意の波面を形成する。

ただし、数学モデル構築にはさまざまな仮定をおかざるを得ない。実機による波面制御実験を行うことによって、数学モデルへのフィードバックを行い、数値シミュレータの精度を向上させる。

### (2) 波面推定

波面補償を行うための前提となる波面推定手法を開発する。特に、リモートセンシングでは、事前に観測対象がわからない場合が多いため、アプリアリ情報を利用しない汎用的な手法が求められる。前年度に開発した波面制御技術を応用して、光学系に既知の収差を与えたときの画像を用いた波面収差の推定手法を開発する。

### ① 波面推定アルゴリズムの検討

観測画像から、波面収差を推定する問題は、ill-posed な逆問題（ブラインドデコンボリューション問題）である。Phase Diversity 法を応用して、空間位相変調器によって光学系に情報（既知の収差）を付加することにより、well-posed な逆問題として定式化する。

この逆問題をオンボードで解くためには、計算負荷を軽減する必要があるため、地上で学習を行い運用時の計算負荷を減らす機械学習手法が求められる。初年度に開発した波面制御技術を応用し、光学系に学習効率を向上させるよう情報を付加する、動的な学習手法を開発する。

学習における汎用性を保証するためには、

画像から観測対象に依存せずかつ収差の情報を含んだ指標を求める必要がある。観測画像に対して、フーリエ空間における演算と主成分分析等を用いた情報抽出処理を行うことによって収差の特徴を抽出し、学習を効率化する手法を開発する。

## ② 波面推定に最適な画像マッチング法の検討

低軌道衛星において Phase Diversity 法を高精度に用いるためには、衛星の運動によって観測対象の位置が変化することを考慮する必要がある。さまざまな地上ターゲットに対して、軌道計算の結果などを盛り込んだテスト画像を作成し、そのマッチング法を開発する。結果を元に Phase Diversity 法に最適なリサンプリングを行い評価を行う。

## ③ 波面推定実験

提案するアルゴリズムを利用して波面推定実験を行う。無限遠観測模擬装置によって地球観測を模擬した観測パターンを配置し、ガラス板の歪あるいは光学系のアライメント誤差等により発生させた収差を推定する。

### (3) 補償光学実験

#### ① 概要

波面制御技術と波面推定技術とを利用した補償光学系を構築する。さらに、衛星の移動により収差推定に利用する画像に平行移動が生じるが、これらの画像のレジストレーションを収差推定と同時に行うことにより、推定精度の向上を実現し、完全画像を取得する実験を行う。

#### ② 衛星の移動によるシフトの推定手法

衛星によるリモートセンシングでは、観測視野の移動を考慮する必要がある。衛星の軌道運動による画像のシフトは、波面のチルト成分 ( $Z_2, Z_3$ ) の変化と考えることができる。従って、Phase diversity を拡張して、 $i$  番目の画像に、未知の  $a_2, a_3$  が加わったと考え、それを他の収差パラメータと同時に推定することによって、観測視野の移動があった場合でも、波面推定の精度を保つことができる。

画像マッチング技術を応用した、同一点のトラッキングにより、対象が移動する場合でも、波面制御-波面推定により、光学系自己修復の実験を行う。画像から収差を推定することにより、ビームスプリッタによる光束分割を必要とせずに SN 比向上を実現する。

#### ③ 実験装置と実験方法

実験装置の構成を図 1 に示す。テストターゲットを白色光源で照射し、コリメータで LCOS-SLM に照射する。LCOS-SLM には任意の波形を入力する。LCOS-SLM への入力信号は、

装置に固有のオフセットと、対象波長での位相  $2\pi$  での折り返しを考慮して設定する。集光レンズで、CMOS カメラに結像し、画像信号を得る。このとき、光学系にミスアライメントを与えることによって収差を発生させ、推定・補償実験を行う。

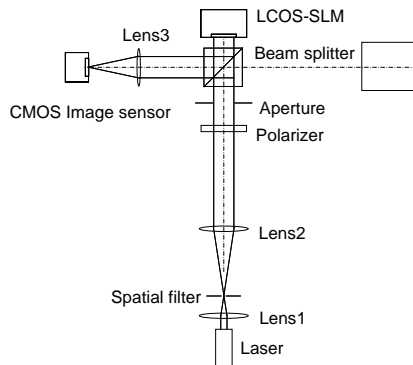


図 1 実験装置の構成

#### 4. 研究成果

##### ① 機械学習による収差推定

観測画像に対して、周波数空間で処理を行い、観測対象に依存しない特徴量を求めた。この結果に対して、主成分分析を行い特徴量の次元削減を行った。さらに、特徴量と波面収差パラメータとをニューラルネットワークによって学習することによって、観測画像から波面収差を推定する手法を導いた。さらに、様々な収差モードに対して、波面変調期によるアプリアリ情報を変化させることによって、推定精度の向上を示した。

##### ② 点光源に対する補償光学実験

点光源に対して、観測画像から波面収差を推定し、LCOS-SLM で補正する補償光学実験を行った。収差の存在する光学系によって得られる PSF (図 2) に対して、波面推定と補正を行ったところ、PSF の理論限界にほぼ一致する結果(図 3)が得られた。

##### ③ テストターゲットを用いた補償光学系の End-to-End 実験

テストターゲットを観測対象とした補償光学系の End-to-End 実験を行った。光学系のミスアライメントにより収差を発生し、提案する手法で収差推定を行い、その結果に基づき光学系を補正した。LCOS-SLM を用いて、逆問題のアプリアリ情報としての Phase diversity を適切に選択して、LCOS-SLM によって光学系に付加した。従来の Phase diversity 法において用いられているデフォーカスによるアプリアリ情報を用いる場合と比較して、特定の収差モードに対する収差パラメータの推定精度が向上することを示した。その結果、補償光学系によって、理論限界に近い性能が得られた。

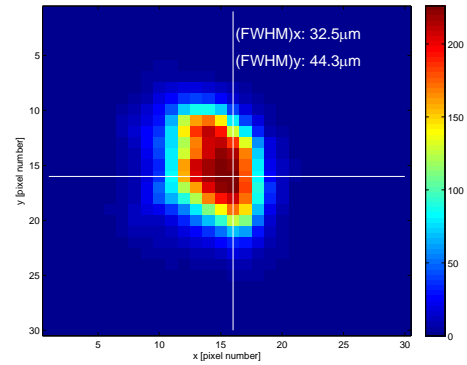


図 2 収差のある光学系による PSF

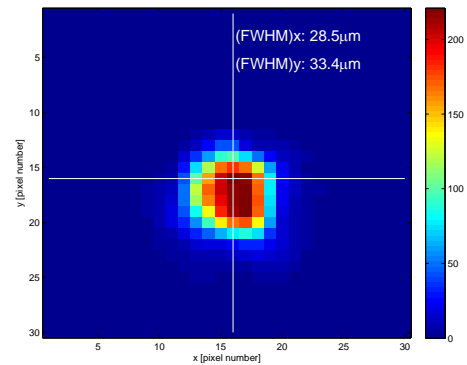


図 3 補償光学系による PSF

##### ④ 衛星姿勢変動に伴う画像歪の発生と補償

衛星の姿勢変動は取得したリモートセンシング画像に歪を発生させる。このため、実際の位置精度をずらしてしまい、問題となる。とりわけ、ラインセンサでの観測においては、各時刻の姿勢情報をすべて記録することができないために、その解決が求められている。このような衛星画像を理想的にするために、姿勢変動に起因する歪を検出する手法を検討した。ここでは、ALOS や ASTER、Kaguya/LISM/TC など日本のセンサにおいて優位な技術であるステレオ視を有するセンサを例として取り上げる。

2 時期の異なるデータが得られた場合には、それぞれの画像の幾何投影時にセンサ座標も地図投影し、センサ座標値で衛星の姿勢変動やセンサの視線ベクトルの誤差の影響を取り除く手法が有効である。図 4 はエチオピアにおける 2005 年の地震前後の標高モデルの変化を示す。衛星の姿勢変動に起因する縞状のパターンが得られるが、ラインセンサの方向に平均化処理を行うことで、直下観測時のピッチ振動の影響を取り除くことができる。同様に、後方視観測時のピッチ振動もラインセンサの方向が斜めになっていることを利用して取り除くことができる。

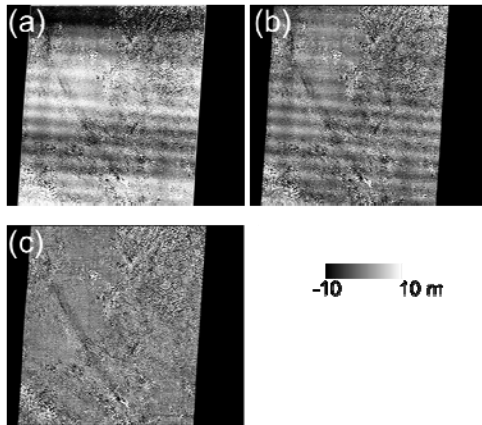


図4 地震前後の画像から求めた垂直変位  
(a)補正無し(b)直下観測補正(c)補正後

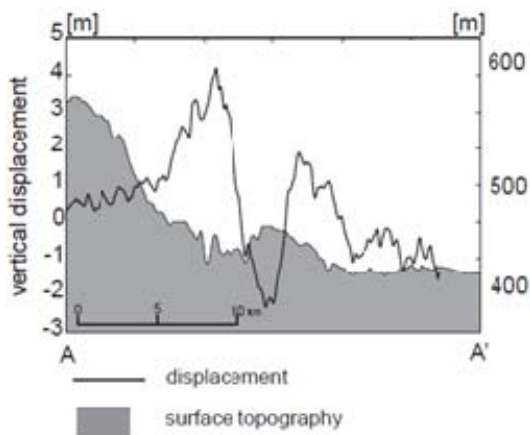


図5 断層を横切る面での地形および地盤変動

得られた結果について、断層を横切る断面を図5に示す。この地震では地下のマグマの動きにより、地震によって正断層の動きを示しており、断層の両側が離れるような動きをしている。それによって、真ん中での沈み込みが起こっている。沈み込みの大きさ3m程度であり、本来、標高モデルを作成できる限界に近い1ピクセルの視差(2.5m)に迫るものであり、姿勢変動の大きさ(約10mの変動)よりも十分小さいものでも、システムティックな補正が有効に作用することを示している。

このように2時期のデータだけで相対的な解析は可能であるため、科学的な解析に用いることで性能向上が期待される。一方、センサの幾何学的拘束条件を利用することで、センサによっては、絶対的な幾何補正を行うことも可能となっており、その利用が期待される。今後は、このような自己修復機能を有するデータ取得手法を組み込むことが重要と考えられる。

## 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6件)

- ① N. Miyamura, Generalized phase diversity method for self-compensation of wavefront aberration using spatial light modulator, *Optical Engineering*, vol.48, 査読有, 2009, pp.128201\_1-8
- ② J. Haruyama, K. Hioki, M. Shirao, T. Morota, H. Hiesinger, C. H. Bogert, H. Miyamoto, A. Iwasaki, Y. Yokota, M. Ohtake, T. Matsunaga, S. Hara, S. Nakanotani, and C. M. Pieters, Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, vol. 36, 2009, pp.L21206\_1-5
- ③ M. Ohtake, T. Matsunaga, J. Haruyama, Y. Yokota, T. Morota, C. Honda, Y. Ogawa, M. Torii, H. Miyamoto, T. Arai, N. Hirata, A. Iwasaki, R. Nakamura, T. Hiroi, T. Sugihara, H. Takeda, H. Otake, C. M. Pieters, K. Saiki, K. Kitazato, M. Abe, N. Asada, H. Demura, Y. Yamaguchi, S. Sasaki, S. Kodama, J. Terazono, M. Shirao, A. Yamaji, S. Minami, H. Akiyama and Jean-Luc Josset, The global distribution of pure anorthosite on the Moon, *Nature*, 査読有, vol. 461, 2009, pp.236-241
- ④ T. Takayama, A. Iwasaki, Y. Yokota, T. Morota, J. Haruyama, T. Matsunaga, and M. Ohtake, Validation of Frame Transfer Correction of SELENE/LISM/MI, *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 査読有, vol. 49, 2011, pp. 2911-2917
- ⑤ M. Koga and A. Iwasaki, Improving the Measurement Accuracy of Three-Dimensional Topography Changes Using Optical Satellite Stereo Image Data, *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 査読有, vol. 49, 2011, pp. 2918-2923
- ⑥ N. Miyamura, On-Orbit Self-Compensation of Satellite Optics Using Spatial Light Modulator, *Transactions of JSASS, Space Technology Japan*, 査読有, vol.8, pp.Pn\_1-Pn\_6, 2010

[学会発表] (計20件)

- ① N. Miyamura, On-Orbit Self-Compensation of Satellite Optics Using Spatial Light Modulator, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 7 Jul. 2009, Tsukuba

- ② N. Miyamura, On-orbit self-compensation of satellite optics using spatial light modulator, SPIE Optics + Photonics, 2 Aug. 2009, San Diego
- ③ 宮村 典秀, 空間光変調器による光学系の収差補正実験, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009 年 9 月 9 日, 京都
- ④ N. Miyamura, Onboard Wavefront Estimation Using Spatial Light Modulator as a Phase Diversity Generator, IEEE Sensors 2009 Conference, 25 Oct. 2009, Christchurch
- ⑤ 古賀勝, 岩崎晃, 衛星搭載光学センサを用いた三次元幾何解析の高精度化, 日本リモートセンシング学会 第 47 回(平成 21 年度秋季) 学術講演会, 2009 年 11 月 27 日, 名古屋
- ⑥ 菅野宏人, 岩崎晃, 衛星搭載光学センサの振動補正による幾何精度の向上, 日本リモートセンシング学会 第 47 回(平成 21 年度秋季) 学術講演会, 2009 年 11 月 27 日, 名古屋
- ⑦ 奥田哲矢, 岩崎晃, ASTER 観測画像による衛星ピッチ振動の推定, 日本リモートセンシング学会 第 47 回(平成 21 年度秋季) 学術講演会, 2009 年 11 月 27 日, 名古屋
- ⑧ N. Miyamura, Test results of optimal phase diversity selection using a LCOS-SLM for remote sensing adaptive optics, SPIE Photonics Europe, 12 Apr. 2010, Brussels
- ⑨ 岩崎晃・宮村典秀・江野口章人・武山芸英・中須賀真一, 超小型衛星による高解像度撮像ミッション, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑩ 宮村 典秀, 空間光変調器を用いた補償光学技術, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑪ 横矢 直人・宮村 典秀・岩崎 晃, ハイパースペクトルデータにおける光学特性の改善, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑫ 岡野 大・宮村 典秀・岩崎 晃, 空間光変調器を用いた回折格子の分光特性, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑬ 益子 遼介・宮村典秀・岩崎晃, 空間光変調器を用いた補償光学系に関する研究, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑭ 眞弓 典正・岩崎 晃, ハイパースペクトル

とマルチスペクトル画像を用いたシャープン画像生成, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば

- ⑮ 奥田哲矢・岩崎晃, 短基線ステレオ視システムにおける衛星振動補正, 日本リモートセンシング学会 第 48 回(平成 22 年度春季) 学術講演会, 2010 年 5 月 27 日, つくば
- ⑯ 眞弓 典正・岩崎 晃, 3D ディスプレイでの立体視可能な衛星画像ビューアーの開発, 日本リモートセンシング学会 第 49 回(平成 22 年度秋季) 学術講演会 2010 年 11 月 9 日, 鹿児島
- ⑰ 齊藤 甲次朗・岩崎 晃, ASTER 多時期 DEM を用いたエベレスト山岳氷河の標高変化, 日本リモートセンシング学会 第 49 回(平成 22 年度秋季) 学術講演会 2010 年 11 月 9 日, 鹿児島
- ⑱ N. Yokoya and A. Iwasaki, A maximum noise fraction transform based on a sensor noise model for hyperspectral data, The 31st Asian Conference on remote sensing, 1 Nov. 2010, Hanoi
- ⑲ 宮村 典秀, 小型衛星によるリモートセンシングに向けた補償光学技術, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2010 年 11 月 17 日, 静岡
- ⑳ N. Miyamura, Image-based adaptive optics system with deformable mirror in small satellite remote sensing, SPIE Remote Sensing, 21 Sep. 2011, Prague

[図書] (計 1 件)

- ① A. Iwasaki, Intech, "Detection and Estimation of Satellite Attitude Jitter Using Remote Sensing Imagery" in *Advances in Spacecraft Technologies*, 2011, 16

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/sal/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩崎 晃 (IWASAKI AKIRA)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授  
研究者番号: 40356530

### (2) 研究分担者

宮村 典秀 (MIYAMURA NORIHIDE)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教  
研究者番号: 50524097