

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500195

研究課題名(和文)小惑星探査機はやぶさ2に搭載される複数の探査ローバによるセンサネットワークの構築

研究課題名(英文) Asteroid Wide Area Exploration System Using Plural Small Rovers and Wireless Sensor Network

研究代表者

三河 正彦 (Mikawa, Masahiko)

筑波大学・図書館情報メディア系・准教授

研究者番号：40361357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星探査のためのインテリジェントシステムとして、複数台で一つのシステムとして機能する小型ローバ群によるセンサネットワークに基づく小惑星探査手法を提案している。複数台のローバ間でメッシュ型無線ネットワークを構築することにより、広範囲を効率良くかつトラブルに頑健な探査活動が可能となる。またメッシュネットワークは、複数ローバ間で通信した時に得られる電波強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)に基づき、小惑星上での各ローバの相対距離を推定することができ、例えば地盤探査により小惑星内部構造の解析等の活用することができる。

研究成果の概要(英文)：We are proposing an asteroid exploration robot system consisting of plural small size rovers. Each rover can communicate with others using radio, and a wireless mesh network is configured on an asteroid's surface. Our proposed system has the following three advantages against a conventional exploration system using one or two rovers: (1)It is possible to explore a wider area of an asteroid efficiently. (2)Since the mesh network has redundant communication paths, our exploration system has more robustness against some troubles. (3)It is possible to estimate the relative distances among plural rovers by using the mesh network.

研究分野：知能ロボット

キーワード：小惑星探査 探査ローバ 探査ロボット センサネットワーク 相対距離推定

## 1. 研究開始当初の背景

2010年に小惑星探査衛星「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」の試料を地球に持ち帰るといふ人類初の快挙を成し遂げたことは記憶に新しい。はやぶさには移動機構を備える小惑星探査ローバ「ミネルバ」が搭載されていたが、投下に失敗し、イトカワに着陸できなかった。一方アメリカ航空宇宙局(NASA)は、はやぶさと同様に小惑星から試料を採取する探査機「OSIRIS-REx」を2016年に打ち上げると発表があった。JAXAはそれに先駆け、後継機「はやぶさ2」を2014年に打ち上げ、小惑星「1999JU3」の試料を持ち帰る計画である。同時に小惑星表面探査ロボット「MINERVA-II」が2機搭載される予定である。初代のはやぶさに搭載されたMINERVAの改良型(MINERVA-II-1)が搭載され、もう一機(MINERVA-II-2)は2011年4月に設立されたJAXA、大学、研究機関、企業からなる「MINERVA-II コンソーシアム」で研究開発するものが搭載される。そこで本研究の研究代表者は無線ネットワークを利用した複数の小型ロボットによる小惑星表面探査手法を提案し、研究開発を進めている。

## 2. 研究の目的

MINERVA-II-2に要求される機能は次の4点である。

- (1) 移動機能
- (2) 探査機能
- (3) 自己位置推定
- (4) 省電力設計

我々の新規提案は、移動機構と複数のセンサを備え、複数台で一つのシステムとして機能する小型ロボット群を研究開発することである。図1に示すように本システムは、小惑星探査のためのセンサ情報を収集する複数の子機(一辺30[mm]の立方体)と、はやぶさ2を介して地球と交信する親機で構成される。小惑星の微小重力( $10^{-3} \sim 10^{-7}G$ )に適したホッピング移動機構を備える。はやぶさ2が小惑星到着後、図2に示すように本システムがはやぶさ2から放出され、分離しながら小惑星表面へ降下、地球から発信するコマンドに基づき親機と子機を個別に移動させながら、小惑星探査を実施する。図3に示すように、ロボット間でメッシュ型無線ネットワークを構築することにより、従来の1台だけの探査に比べ、広範囲を効率良くかつトラブルに対して頑健に探査活動が可能となる。またメッシュ型ネットワークを利用した小惑星上での各ロボットの自己位置推定により、従来の無人探査では困難だった位置を特定したセンサデータ収集が可能となる。

前述の要求機能(1)~(4)を実現するために、移動機構と、メッシュ型ネットワークによる自己位置推定機能を担当する研究チームに分かれ、検討を進める。

本研究の目的となる研究代表者の担当は、親機と子機が頑健なセンサネットワークを構成し、子機が収集したセンサデータを地球に送信する機能、親機/子機の自己位置推定

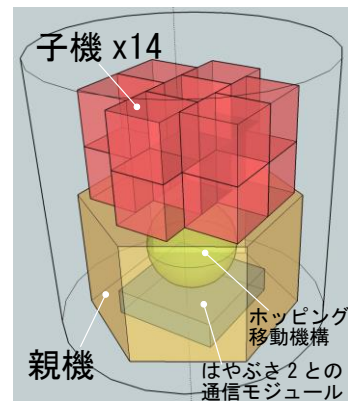


図1 親機と複数の子機から構成されるMINERVA-II-2

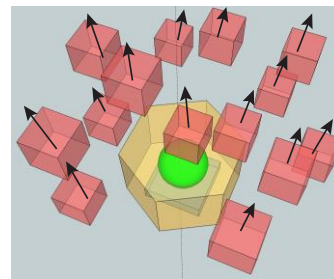


図2 分離しつつ小惑星へ放出

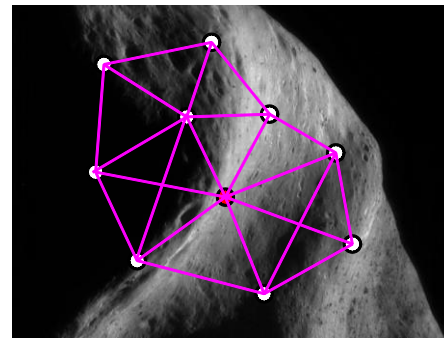


図3 小惑星表面でメッシュ型ネットワークを構成

機能を実現することである。以下に示す三つの目的を軸に研究を進める。

[目的1] 図3に示すように、動的なメッシュ型ネットワークを構成することにより、トラブルにより一部のロボットが欠損した場合でも、探査ミッションを続行することが可能な通信機能を確立する。ネットワークには安価で低消費電力の短距離無線通信規格のZigBeeを利用する。親機とはやぶさ2を介して、子機が収集したセンサデータを地球へ送信する。

[目的2] メッシュ型ネットワークの受信信号強度(RSSI)を利用し、複数の探査ロボット間の相対位置関係を算出する自己位置推定機能を実現する。ただし複雑な計算を探査ロボット内で行うことは省電力化のため困難なので、収集したRSSIを地球へ送信し、地球上で自己位置推定のための解析/推定計算を行う。

[目的3] 太陽電池パネルと充電電池として機能する電気二重層コンデンサを電源とする小型探査ロボットは、低消費電力のシステムとして設計する必要がある。ロボット

の構成部品で消費電力の大きいものが、移動機構のアクチュエータと ZigBee 通信である。現在の検討では、親機 1.5W、子機 0.3W 程度の発電量しか確保できないので、通信/センサ入力機能を持つ省電力マイコンを用いる。

### 3. 研究の方法

本研究の3つの目的を実現するために、次の3項目について研究開発を進める。

- (a) メッシュ型ネットワークによる通信機能の実装
- (b) 自己位置推定機能の検討
- (c) 実機の製作と耐久試験の実施

(a)については、ZigBee 規格の物理層と MAC 層のみ定義した IEEE802.15.4 を利用し、通信機能の実装を進める。ZigBee プロトコルを利用すると、より簡単にメッシュ型ネットワークを構築できるが、反面、通信手順が自動化され、問題発生時に開発側で原因の把握できなくなるデメリットがある。

(b)については、小惑星上の探査ロボットに搭載された CPU で複雑な自己位置推定計算を行うのではなく、ロボット間で通信すると計測できる RSSI を地球に送信し、地球上のコンピュータで自己位置推定計算を行う。複数のノード(親機/子機)から得られる RSSI から、三角測量の原理に基づきノード間の相対位置を算出することができる。

(c)については、研究開発実績の豊富な JAXA やコンソーシアム参加大学等から助言を受けつつ、実機の製作と耐久試験を行う。

### 4. 研究成果

平成 24 年度は、省電力通信方式 IEEE802.15.4 を利用した通信デバイスと、省電力 CPU を用いた探査ロボット試作機の作製と、複数探査ロボット間で通信を行った際に得られる RSSI に基づく複数ロボット間の相対位置姿勢推定手法の提案を行った。

これまでの研究で、2つの通信アンテナ間の距離と RSSI は、直接波と地面との反射波の干渉により、図4に示すように非線形な関係となることが分かっていた。しかしながら、本研究において試作する小型ロボットの場合、アンテナ高さが通信電波の波長よりも短いため干渉が起こらず、2つのアンテナの

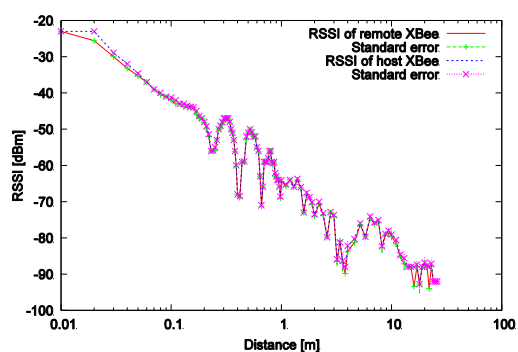


図4: アンテナ間の距離と RSSI の関係(アンテナ高さ 500[mm])

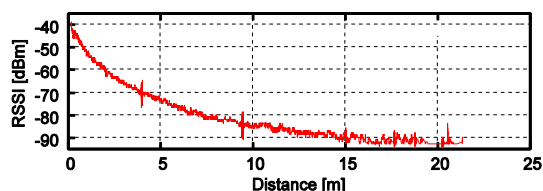


図5: アンテナ間の距離と RSSI の関係(アンテナ高さ 30[mm])

相対姿勢を固定した場合、図5に示すように線形な関係が得られることが分かった。

それと同時に、アンテナの方向(姿勢)に関しては非線形の特徴があることも分かっており、これらの結果に基づき、2つのアンテナ間の距離と姿勢、および RSSI 間の関係を表す数理モデルを設計した。

また、我々が提案する探査ロボットを図6に示す。小惑星上のような微小重力下では、タイヤやクローラのような摩擦を利用した移動機構はうまく機能せず、初代はやぶさに搭載された小型探査ローバミニネルバのように、ホッピングによる移動機構が有効である。一方、着地時の姿勢制御が困難であった。そこで我々の探査ロボットは、図6に示すように立方体形状を採用し、各面に2つずつ通信アンテナを具備することにより、どのような姿勢で着地しても常に2つのアンテナが上面に位置し、常に良い通信状態を保つことができる。また、通信機能を有する省電力 CPU を用い製作した試作機を図7に示す。

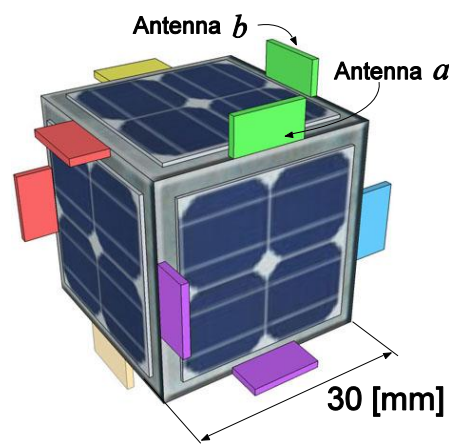


図6: 1面に2個ずつ、合計12個のアンテナを備える探査ロボット

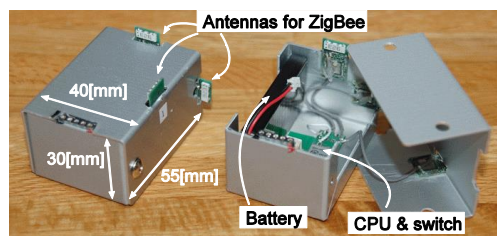


図7: 複数のアンテナを備える試作機

1台のローバにつき2つのアンテナを用いることにより、3次元空間における探査ロボットの位置と姿勢(6自由度)を推定することが可能となる。ただし、位置姿勢の推定には、



非線形連立方程式を解くことになるため、本研究では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)を用いることとした。その評価関数は、実測 RSSI と推定位置姿勢から算出した推定 RSSI の差の二乗和とした。

東北大学宇宙ロボット研究室の助けを借り、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所において、はやぶさ 2 に搭載される MINERVA-II の行程を想定した耐放射線試験を 2012 年 11 月に実施し、本研究で用いた CPU および通信機器は、放射線放射後も問題無く動作することが確認できた。

当初はやぶさ 2 に搭載される MINERVA-II での採用を目指し、MINERVA-II コンソーシアムに研究チームを組織し参加してきた。ところが、平成 24 年 6 月 6 日開催のコンソーシアムにおいて、我々が提案していた複数の小型ローバによるセンサネットワーク探査手法が採用されないことが決定した。それに伴い、研究開発目標を 2014 年に打ち上げられるはやぶさ 2 に搭載される MINERVA-II ではなく、はやぶさ 2 の次世代機はやぶさ Mk2 や海外の探査機に変更せざるを得なくなった。

平成 25 年度は、RSSI に基づく複数ロボット間の相対位置姿勢推定手法の改良による推定精度の向上を図った。本研究のような複雑な非線形連立方程式を GA で解く場合、真値ではなく近似値が求まる場合が多く、GA の初期値(初期個体)によって、近似値の精度が左右される。そこで、毎回異なる初期値で GA による相対距離を 500 回推定し、その中から評価関数を最小化する推定結果を算出する。これを 100 回繰り返し、求まった 100 組の推定結果の平均値を最終的な推定結果とする。このようにして求めた推定相対距離のシミュレーション結果を 2 例示す。ただし探査ロボット間の地面は平坦であると仮定する。

<シミュレーション結果 1(2 台のロボット)>

図 8 に示す 2 台の探査ロボット間の相対距離推定の結果を、表 1 に示す。誤差が無く真値が求まっていることが分かる。

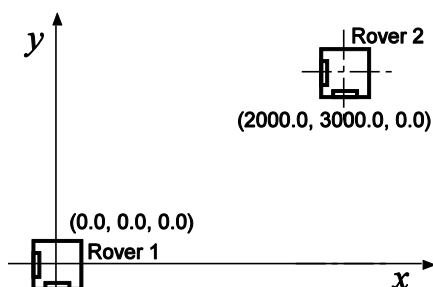


図 8: 2 台の探査ロボットの配置

表 1: 2 台の探査ロボット間の推定距離

	True value [mm]	Average of estimated value	Error rate [%]
$d_{12}$	3605.6	3605.6	0.0

<シミュレーション結果 2(9 台のロボット)>

次に図 9 に示すように、探査ロボットの台数を 9 台に増やし、それぞれの距離も大きく設定し、相対距離を推定した。推定結果を表 2 に示す。最も悪いもので 6.8[%]の推定誤差があるが、精度良く推定できていることが分かる。

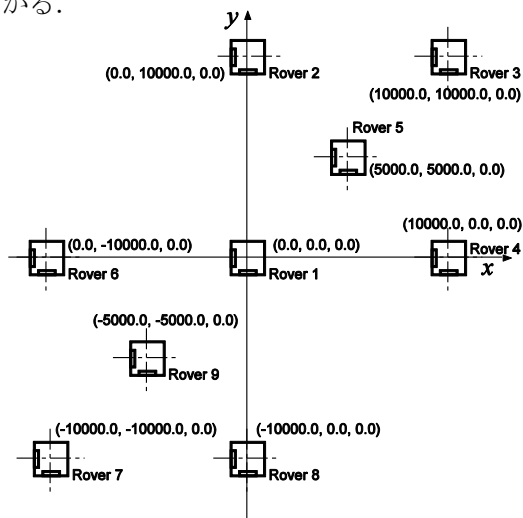


図 9: 9 台の探査ロボットの配置

表 2: 9 台の探査ロボット間の推定距離

	True value [mm]	Average of estimated value	Error rate [%]
$d_{12}$	10000.0	10337.6	3.4
$d_{13}$	14142.1	14355.2	1.5
$d_{14}$	10000.0	10155.7	1.6
$d_{15}$	7071.1	7321.8	3.5
$d_{16}$	10000.0	10148.9	1.5
$d_{17}$	14142.1	14118.5	0.2
$d_{18}$	10000.0	10077.8	0.8
$d_{19}$	7071.1	7100.4	0.4
$d_{23}$	10000.0	9947.3	0.5
$d_{24}$	14142.1	13888.1	1.8
$d_{25}$	7071.1	7164.1	1.3
$d_{26}$	20000.0	19766.5	1.2
$d_{27}$	22360.7	22448.8	0.4
$d_{28}$	14142.1	15103.5	6.8
$d_{29}$	15811.4	15910.9	0.6
$d_{34}$	10000.0	10101.3	1.0
$d_{35}$	7071.1	7366.4	4.2
$d_{36}$	22360.7	22039.6	1.4
$d_{37}$	28284.3	27761.6	1.8
$d_{38}$	22360.7	22454.9	0.4
$d_{39}$	21213.2	20895.2	1.5
$d_{45}$	7071.1	7199.2	1.8
$d_{46}$	14142.1	14230.2	0.6
$d_{47}$	22360.7	21868.4	2.2
$d_{48}$	20000.0	19560.2	2.2
$d_{49}$	15811.4	15477.7	2.1
$d_{56}$	15811.4	15626.4	1.2
$d_{57}$	21213.2	20870.8	1.6
$d_{58}$	15811.4	15912.2	0.6
$d_{59}$	14142.1	13902.8	1.7
$d_{67}$	10000.0	9853.0	1.5
$d_{68}$	14142.1	13931.7	1.5
$d_{69}$	7071.1	7212.3	2.0
$d_{78}$	10000.0	10025.4	0.3
$d_{79}$	7071.1	7257.5	2.6
$d_{89}$	7071.1	7195.1	1.8

平成 26 年度は、探査ロボット間の凹凸のある地形も考慮した相対位置姿勢推定手法を新たに提案すると共に、位置姿勢推定を実現するために提案してきた 1 台あたり 12 個のアンテナを備え、1 辺 30[mm]の小型探査ロボットを試作した。

図 10 に示すように、探査ロボット間の地形に凹凸があることを考慮し、電波伝播モデルとしてナイフエッジ回折モデルを用いた RSSI とアンテナの相対位置姿勢の関係性を数理モデル化した。本モデルにより凸地形だけではなく、凹地形も表現することができる。これまでの探査ロボットの位置姿勢推定に加え、ロボット間の凹凸地形の高さと位置も推定するので、9 台以上のロボット間で通信した RSSI を用いることとなる。これまでと同様に、探査ロボットの相対位置姿勢を推定するには非線形連立方程式を解く必要があるため、GA により近似値を推定した。シミュレーションによる実験を行った。図 11 に示すように 9 台の探査ロボットを配置した。相対位置の推定結果を表 3 に示す。これまでよりも非線形性がより強い連立方程式となるため、推定誤差がまだ大きく、改良の余地がある。

1 台あたり 12 個のアンテナを備えた探査ロボットを 10 台作製したので、その一部を図 12 に示す。

平成 26 年度で本研究課題のための助成は終了となるが、地形を考慮した相対位置推定の精度向上、実機を用いた提案手法の評価、研究成果の公表等は平成 27 年度以降も継続して進める予定である。

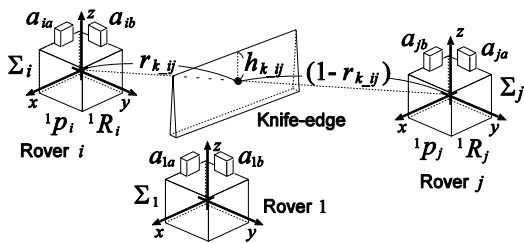


図 10: ナイフエッジ回折モデル

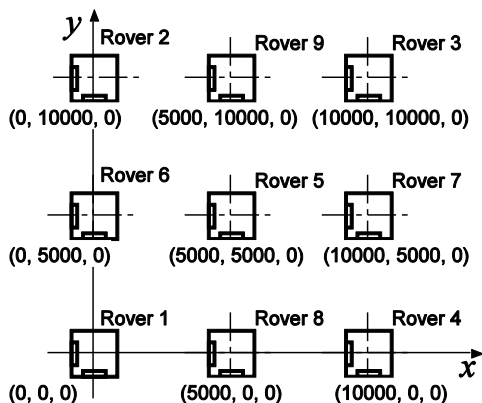


図 11: 9 台の探査ロボットの配置

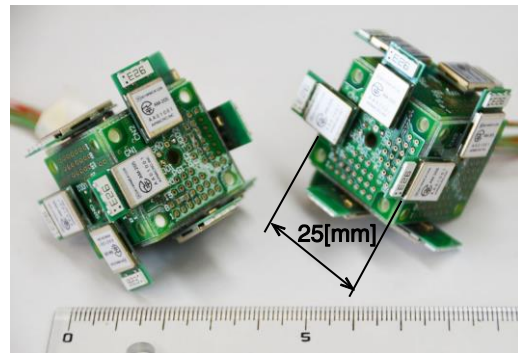


図 12: 試作した探査ロボッ

表 3: 9 台の探査ロボット間の推定距離

	True value [mm]	Estimated value [mm]	Error [%]
$d_{12}$	10000.0	7969.3	20.3
$d_{13}$	14142.1	10651.7	24.7
$d_{14}$	10000.0	8341.4	16.6
$d_{15}$	7071.1	3657.0	48.3
$d_{16}$	5000.0	4302.4	14.0
$d_{17}$	11180.3	7851.6	29.8
$d_{18}$	5000.0	4551.2	9.0
$d_{19}$	11180.3	7791.5	30.3
$d_{23}$	10000.0	11004.5	10.0
$d_{24}$	14142.1	14790.5	4.6
$d_{25}$	7071.1	7760.7	9.8
$d_{26}$	5000.0	5481.7	9.6
$d_{27}$	11180.3	11840.0	5.9
$d_{28}$	11180.3	11789.9	5.5
$d_{29}$	5000.0	5922.3	18.4
$d_{34}$	10000.0	11250.2	12.5
$d_{35}$	7071.1	7698.7	8.9
$d_{36}$	11180.3	11919.4	6.6
$d_{37}$	5000.0	5948.8	19.0
$d_{38}$	11180.3	11967.1	7.0
$d_{39}$	5000.0	5815.5	16.3
$d_{45}$	7071.1	7681.4	8.6
$d_{46}$	11180.3	11803.8	5.6
$d_{47}$	5000.0	5838.3	16.8
$d_{48}$	5000.0	5571.5	11.4
$d_{49}$	11180.3	12069.4	8.0
$d_{56}$	5000.0	5730.8	14.6
$d_{57}$	5000.0	5352.6	7.1
$d_{58}$	5000.0	5644.6	12.9
$d_{59}$	5000.0	5588.9	11.8
$d_{67}$	10000.0	10513.5	5.1
$d_{68}$	7071.1	7820.1	10.6
$d_{69}$	7071.1	7664.1	8.4
$d_{78}$	7071.1	7615.6	7.7
$d_{79}$	7071.1	7773.3	9.9
$d_{89}$	10000.0	10593.5	5.9
Average error rate			13.1

## 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)

[学会発表] (計 8 件)

<査読付国際会議>

- (1) Masahiko Mikawa, “Asteroid Exploration Using Plural Small Rovers and Relative Distance Estimation on Undulating Terrain,” 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS2014), 2C01 (7 pages), Montreal, Canada, 査読有り, Jun. 2014.
- (2) Masahiko Mikawa, “Self-Localization Using Plural Small Rovers for Asteroid Wide-Area Exploration,” 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), pp.769-774, Tokyo, Japan, 査読有り, Nov. 2013.
- (3) Masahiko Mikawa, “Asteroid Wide-area Exploration System Using Plural Small Rovers and Relative Distance Estimation,” 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST2013), pp.949-954, Istanbul, Turkey, 査読有り, Jun. 2013.

<査読無国内会議>

- (4) 三河 正彦, “複数の小型ローバが構成する無線ネットワーク網による地形の起伏を考慮した相対距離推定”, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2H04, 長崎ブリックホール(長崎県長崎市), 査読無し, 2014 年 11 月.
- (5) 三河 正彦, “小惑星探査のための複数の小型ローバシステムと無線ネットワークを利用した相対位置推定”, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, ROMBUNNO. 1M12, 査読無し, 米子コンベンションセンター(鳥取県米子市), 2013 年 10 月.
- (6) 三河 正彦, “小惑星探査のための無線ネットワークによる複数ローバの相対距離推定”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2013AC3N1-02, 査読無し, 首都大学東京南大沢キャンパス(東京都八王子市), 2013 年 9 月.
- (7) 三河 正彦, 田中 和世, “無線ネットワークを利用した小惑星探査手法”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 2G2-3, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市), 査読無し, 2012 年 9 月.

<口頭発表のみ>

- (8) 三河 正彦, “小惑星探査のための複数ローバシステムの通信評価実験”, 第 6 回伊豆大島無人観測ロボットシンポジウム, <http://volcano-robot.org/schedule.htm> 1, 査読無し, 2014 年 11 月 8 日.

[その他]

ホームページ等

<http://www.slis.tsukuba.ac.jp/~mikawa/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三河 正彦 (MIKAWA Masahiko)

筑波大学・図書館情報メディア系・准教授

研究者番号 : 40361357