

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 30 日現在

機関番号：12201
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2013～2015
 課題番号：25420210
 研究課題名(和文) 環境磁気をランドマークとした自律移動法における磁気伝播解析及び磁気マップの作成

 研究課題名(英文) Magnetic propagation analysis and generation of magnetic map for autonomous navigation method based on magnetic filed as landmarks

 研究代表者
 尾崎 功一 (Ozaki, Koichi)

 宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

 研究者番号：60282381

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、環境中の磁場変化パターンをランドマークとして地図化し、それに基づいて移動ロボットの自律ナビゲーションを実現することを目的としている。磁場は環境からだけでなく、ロボットの電子機器からも発せられる。そこで、電子機器の磁場の影響を調査し、センサの配置基準を示し、ロボット自体の磁場の影響を明らかにした。さらに、環境中の磁気測定を行い、2次元および3次元の磁気マップを作成する方法を開発した。実用上、磁気の測定点は疎らになってしまう。そこで、ガウス過程を参考に非測定領域を補間して地図化する方法を開発した。自律走行における磁気マップの可用性は、ロボット実験特区などの実証試験で確認されている。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is aims at development of a generation method of variation pattern of magnetic intensity as landmarks for autonomous navigation of mobile robots. There is magnetic filed in not only actual environment also electronics devices on mobile robots. Therefore, we investigated the effects of magnetic filed on electronics devices, designed the placement reference of the magnetic sensor, and it revealed the influence of the magnetic field of the robot itself. The robot measures the magnetic filed in the actual environment. By this data, we have developed a generation method for magnetic map of 2D or 3D. In practical, the measurement points are not continuous. In this method, magnetic intensity in gap between measurement points is interpolated based on Gaussian process. The availability of the magnetic map for autonomous navigation was verified by the experimented results in the specific district for the personal mobility.

研究分野：ロボティクス

キーワード：移動ロボット 環境磁場 磁気マップ 自律ナビゲーション パーソナルモビリティ 磁気ナビゲーション

1. 研究開始当初の背景

社会の役に立つロボットを実現するためには、ロボットが人の生活するそのままの環境で安全に行動できることが必要である。また、ロボット研究は基礎理論をシミュレーションで検証するだけでは不十分と云われるようになってきた。このようなことから、実環境ロボットチャレンジ（つくば市で開催されることから通称「つくばチャレンジ」と呼ばれる）が開催されている。ここでは、ロボットのためのインフラ整備なしに、人が普通に往来するそのままの街中で1 km超の指定コースを完全自律で走行することが課題として与えられる。

課題達成には自己位置推定法が不可欠であるが、その方法としてGPSの利用が有力と云われていた。しかし、ロボットの適用環境は公園内や歩道であり、樹木やひさしが多く存在する。このため、GPS信号の安定した受信は不可能である。実際にGPSの利用は少数派となっている。

つくばチャレンジで完走を果たしたロボットは、測域センサで周辺空間をスキャンし、あらかじめ記録された地図と照合する方法（ここでは「地図照合法」と呼ぶ）で自己位置推定を行う。しかし、通行人、案内等の仮設の物体、自然的な環境変化（樹木の落葉など）により周辺空間は常に変化する。このため、地図照合法には実用的な利用のための工夫が必要である。その一つの方法として、上下スキャンを含めた3次元スキャンが一般化しつつある。これは3次元地図照合により、マッチングポイントを増やすことがねらいであるが、本質的な問題解決とは云えない。

申請者は、環境磁気存在に注目し、環境磁気をランドマークとする「磁気ナビゲーション法」を提案してきた（申請者特許4910219他4件）。図1に磁気ナビゲーション法の原理を示す。金属等の環境構造物は、加工・施工過程で着磁することが知られている。ある特定の場所でコンパスの方位に誤差が生じることがあるが、これは環境磁気の影響である。磁気ナビゲーション法とは、環境磁気から発せられる磁気強度の変化パターンをランドマークとして自己位置を推定しながら走行する手法であり、申請者のグループが独自に開発した手法である（申請者特許4910219他4件）。申請者はこの方法によって、つくばチャレンジ2007以降1 km超の自律走行を常に達成し、2009年及び2011年には完走を果たしている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)磁気ナビゲーション法の実装技術の開発、(2)磁気マップの共有化手法の開発、(3)磁気マップの自動作成法の開発である。

3. 研究の方法

(1)については、主に平成25年度にハード

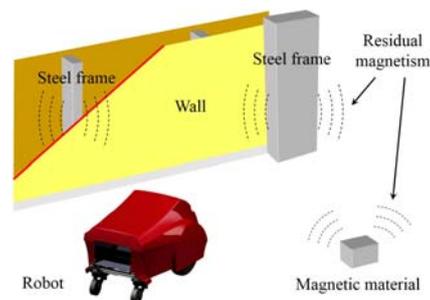


図1 磁気ナビゲーション法の原理

ウェアに関する部分を重視して研究を進めた。その結果、次の成果を得た。

- (a) 現有のつくばチャレンジ用ロボットの磁気分布を測定し、これに基づいて磁気センサの配置方法を明確に調べた。
- (b) 上記による成果に基づき、つくばチャレンジ2013に向け移動ロボットの改良を行った。
- (c) つくばモビリティロボット特区で実験するための搭乗型移動ロボットを製作した。

(2)、(3)については、主に平成26～27年に着手した。これらの研究の舞台としては、「つくば実験特区」及び「つくばチャレンジ」を題材としている。以上については次の結果が得られた。

- (a) つくば実験特区向け搭乗型ロボットによる実証実験を行った。平行して、磁気経路登録及び磁気ナビゲーション法による自律走行実験を実施した。
- (b) つくばチャレンジにおいて、磁気ナビゲーションの実装技術の向上と、異なるロボット同士での地図共有化の試験を行った。
- (c) 磁気マップ作成のための磁場計測方法として、(i)移動ロボット前面に磁気センサ3つを搭載した場合の磁気マップ作成法、(ii)簡便な2軸マニピュレータの先端及び中間に磁気センサを取り付けた磁気計測用ロボット、及びそのロボットを用いた3次元磁場地図の作成方法を、以上の2つを開発した。

4. 研究成果

3. 研究の方法において述べた各項目について記述する。

(1) 磁気ナビゲーション法の実装技術の開発

- (a) 現有のつくばチャレンジ用ロボットの磁気分布を測定し、これに基づいて磁気センサの配置方法を明確に調べた。図2にその結果を示す。その結果より、磁気伝達の理論式とほぼ近似できることが

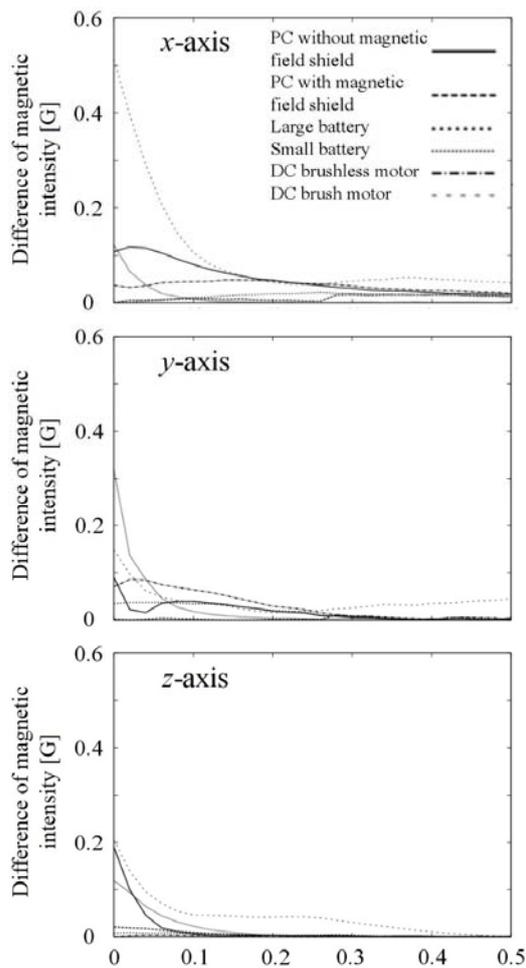


図2 電子デバイスが発する磁気の影響

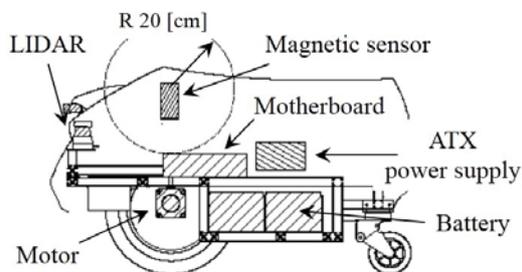


図3 磁気センサの配置

わかった。この成果は日本ロボット学界に投稿し、採択に至った(雑誌論文⑦)。

- (b) 上記による成果に基づき、つくばチャレンジ 2013 に向け移動ロボットの改良を行った。当初は磁気シールドで磁気センサとノイズ源を隔離する必要性が見込まれたが、解析の結果、ノイズ源(主に制御 PC)から一定距離離すだけで十分にノイズを回避できることがわかった(図3)。その結果、ロボットの自己位置推定の安定性が飛躍的に向上し、なおかつ、つくばチャレンジ 2013 では 2.4 km 以上の自律走行を行い、全ての課題を達成することに成功した。なお、同様のシステムを用いたロボットによって、つくばチャレンジ 2014 においても 2.0 km 以



図4 パーソナルモビリティロボット NENA

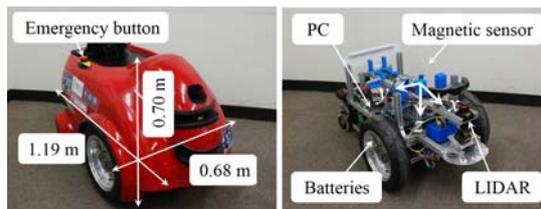


図5 移動ロボット SARA とそのセンサ配置

上の自律走行を行い、全ての課題を達成した。

- (c) つくばモビリティロボット特区で実験するための搭乗型移動ロボットを製作した(図4)。本ロボットは、特区エリアでの磁気マップを作成するために必須のロボットであるが、実験に参加するには実験ナンバー(自動車同様の国交省認可のナンバー登録)が必須である。本研究とは直接関連しないが、安全性を確保する製作上の課題がいくつも指摘され、当初予定よりもナンバー登録が遅れた。しかし、平成 25 年 11 月にナンバー登録を行い、さらに自賠責保険などの学内手続きもあり、平成 26 年 3 月に正式に実験に参加できるようになった。

最初の実験では、移動ロボットが正常かつ安全に操縦走行ができるのを確認するとともに、磁気センサによるデータ登録が可能なのも確認した。

(2) 磁気マップの共有化手法の開発

- (a) つくば実験特区向け搭乗型ロボットによる実証実験を行った。これと平行して、磁気経路登録及び磁気ナビゲーション法による自律走行実験を実施した。ナンバー登録に伴い、平成 27 年 4 月から原則月 1 回の頻度で実験を実施した。当年前半は、ハードウェアの安全性の検証(特区で定められた課題)を行いながら自律走行実験を行い、安全かつ安定に走行できることを確認した。後半に入ってから、レーザ測域センサを用いた SLAM による幾何マップを作成し、そのマップ上に磁気情報を配置する方法を試行的に行った。

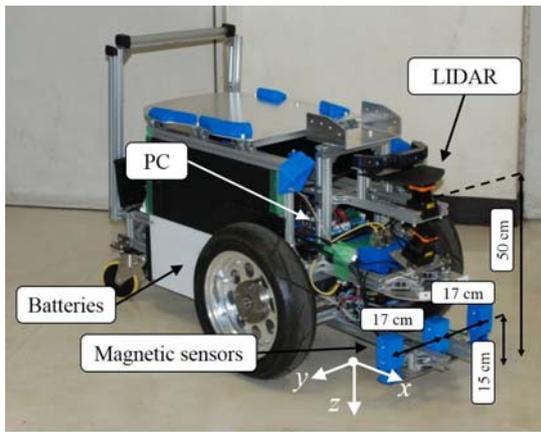


図6 磁気センサを並列的に配置

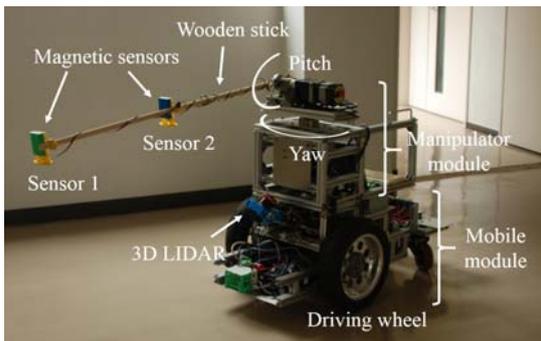


図7 マニピュレータに磁気センサを2つ配置

(b) つくばチャレンジにおいて、磁気ナビゲーションの実装技術の向上と、異なるロボット同士での地図共有化の試験を行った。

平成 26 年においては評価用のロボット 1 台 (図 5) を新たに開発し、部品配置などの構成の異なる 2 台のロボットを用いて、つくばチャレンジの課題に取り組んだ。

地図情報共有化については、あるロボットで磁気経路を記録し、別のロボットでこの磁気経路情報に基づいて走行させるなど、磁気経路の共有化を試した。しかし、完全な共有化には至らなかった。その理由は、経路情報がトポロジ構成で記録されているためで、例えば方向制御での回転速度の違いが位置誤差になる可能性がある。もちろん、磁気ランドマークが見つかれば修正は可能であるが、経路上 (1次元の探索) の情報だけでは十分な位置推定を行うことはできない。ただし、磁気情報の共有化に関しては、磁気センサの配置基準、例えば制御 PC から磁気センサをある程度放して設置するなどの基準を設けることで共有化が可能であることを確認した。

(3) 磁気マップの自動作成法の開発

磁気マップ作成のための磁場計測方法として、(i) 移動ロボット前面に磁気センサ 3 つを並列的に搭載した場合の磁気マップ作成法、そして、(ii) 簡便な 2 軸マニピュレー

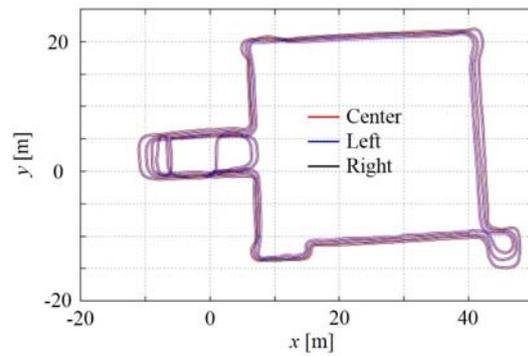


図8 移動経路上の磁気強度

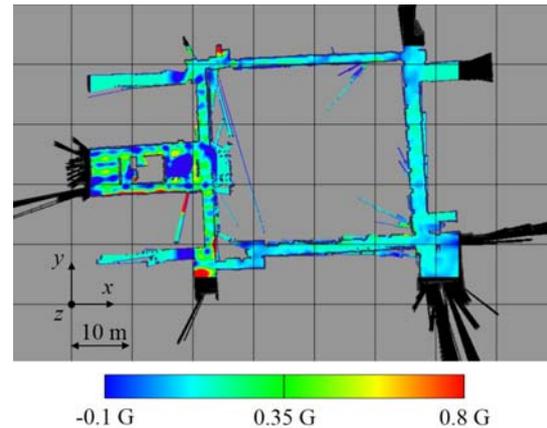


図9 2D 磁気マップ

タの先端及び中間に磁気センサを取り付けた磁気計測用ロボット、及びそのロボットを用いた 3 次元磁場地図の作成方法、以上の 2 つを開発した。

磁気マップの作成に関しては、環境全体において網羅的・捜査的に磁気を測定する必要がある。しかしながら、全体測定にはどの程度の分解能が必要かを知らなければならない。そこで、ガウス過程による測定点間の補完を検討し、実験的に補完の効果を確かめた。その結果、ある程度まばらな測定点であっても実測とほぼ変わらない程度の測定分解能を突き止めた。

その結果に基づき、(i) 及び(ii)の各手法を構築し、実験によってその効果を確かめた。

(i) は移動ロボットの走行経路のみをマップ化した方法であり、比較的簡便に磁気マップを作成することができる。図 8 は移動経路上の磁気強度をプロットしたものである。当然ながら空白の部分は磁気強度の変化を認識することはできない。図 9 はガウス過程に基づいた補完を適用したものであり、走行経路全体の磁気強度を捉え、2次元のマップ化に成功した。

(ii) は空間的な 3 次元磁気マップを作成するものである。マニピュレータで磁気センサを一定周期で上下左右も振り、軌道上の磁気強度を記録した。その結果が図 10 である。これに 2 次元磁気マップ作成と同様に補完フィルタをかけることで図 11 のように 3 次元的な磁気マップを作成することができる。

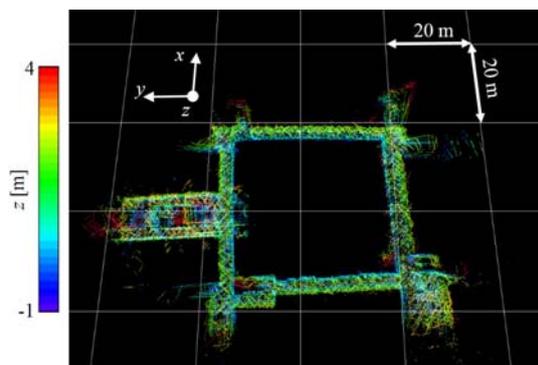


図 10 マニピュレータ軌道上の磁気強度

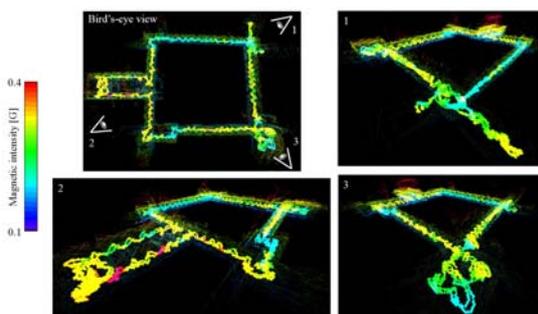


図 11 3D 磁気マップ

またこれにより、高さの違いで磁気マップが変化することが確かめられた。このことから、磁気マップの共有化では、磁気センサの設置高さを合わせる事が重要であることが確かめられた。

磁気マップの作成には、幾何的な地図の上に磁気強度をプロットする必要がある。マップの作成時には、場合によってはレーザ測域センサによる一般的なマップ作成 (SLAM) を行う必要がある。

上記に関しては大学内の室内環境、屋外環境、つくば市のモビリティロボット特区において実施試験を行い、さらに 2015 年の国際ロボット展では現地での磁気マップ作成のデモンストレーションを行った。さらに、採択率の厳しい 2 つの国際会議に論文投稿し採択された。

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 11 件)

① Sam Ann Rahok, Akio TANAKA, Koichi OZAKI, Trajectory Tracking Method Using Low Cost Magnetic Sensors, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 査読有, 2013, pp.270-275

② Naoki Akai, Satoshi Hoshino, Kazumichi Inoue, Koichi Ozaki, Monte Carlo Localization using Magnetic Sensor and LIDAR for Real World Navigation, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 査読有,

2013, pp. 682-687

③ 赤井直紀, Sam Ann Rahok, 井上一道, 尾崎功一, 磁気情報を用いた自己位置推定と横方向位置補正を組み合わせた低コスト構成の長距離ナビゲーション法の実装, 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, 2013, 79 巻, pp.681-690

④ 赤井直紀, 山内健司, 井上一道, 宇内隆太郎, 山本条太郎, 尾崎功一, つくばチャレンジ 2013 の課題を題材とした実環境におけるタスク遂行ロボットの開発, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 2014, 51 巻, pp.24-31

⑤ Naoki Akai, Kazumichi Inoue, Koichi Ozaki, Autonomous Navigation Based on Magnetic and Geometric Landmarks on Environmental Structure in real world, Journal of Robotics and Mechatronic, 査読有, 2014, Vol. 26, pp.158-165 <https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002600020158/>

⑥ Kenji YAMAUCHI, Naoki AKAI, Ryutaro UNAI, Kazumichi INOUE, Koichi OZAKI, Person Detection Method Based on Color Layout in Real World Robot Challenge 2013, Journal of Robotics and Mechatronic, 査読有, 2014, Vol. 26, pp.151-157 <https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002600020151/>

⑦ 赤井直紀, Sam Ann Rahok, 片寄浩平, 島田 遼, 井上一道, 尾崎功一, 磁場の実験的解析に基づく磁気ナビゲーション法の実装, 日本ロボット学会誌, 査読有, 2014, 32 巻, pp.395-402

⑧ Naoki Akai, Kenji Yamauchi, Kazumichi Inoue, Yasunari Kakigi, Yuki Abe, Koichi Ozaki, Development of Mobile Robot "SARA" that Completed Mission in Real World Robot Challenge 2014, Journal of Robotics and Mechatronic, 2015, Vol. 27, pp.327-336 <https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002700040327/>

⑨ Kenji Yamauchi, Naoki Akai, Koichi Ozaki, Color Extraction Using Multiple Photographs Taken with Different Exposure Time in RWRC, Journal of Robotics and Mechatronic, 2015, Vol.27, pp.365-373 <https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002700040365/>

[学会発表] (計 17 件)

① 赤井直紀, 尾崎功一, 環境磁場を利用した自己位置推定と観測の信頼性評価に基づくマルチナビゲータによる自律移動, 第 19 回ロボティクスシンポジウム, 2014

② 赤井直紀, 山内健司, 宇内隆太郎, 山本条太郎, 島田 遼, 松田卓也, 井上一道, 尾崎功一,

つくばチャレンジ 2013 における宇都宮大学チームAの取り組み～環境磁場を利用した市街地環境および探索空間における自律移動～, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2013

③ 山内健司, 赤井直紀, 宇内隆太郎, 山本条太郎, 尾崎功一, 屋外環境における色配置に基づいた人検出法の検証, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2013

④ Naoki Akai, Satoshi Hoshino, Kazumichi Inoue, Koichi Ozaki, Monte Carlo Localization using Magnetic Sensor and LIDAR for Real World Navigation, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013

⑤ Sam Ann Rahok, Akio TANAKA, Koichi OZAKI, Trajectory Tracking Method Using Low Cost Magnetic Sensors, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013

⑥ 赤井直紀, 尾崎功一, 磁気および幾何情報を用いたマルチナビゲータによる自律移動ロボットのナビゲーション法の実装, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2013

⑦ 松田卓也, 井上一道, 赤井直紀, 中田未央, 尾崎功一, パーソナルモビリティの設計構想とロボット特区での開発チャレンジ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集 2013

⑧ 赤井直紀, 尾崎功一, 複数移動手法の強調的動作生成を用いた磁気ナビゲーション法の拡張～ROBOMECH2013における道案内デモンストラーションによる実証実験～, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2013

⑨ Kenji Yamauchi, Naoki Akai, Koichi Ozaki, Precise color extraction method based on color transition due to change in exposure time, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2014

⑩ 赤井直紀, 尾崎功一, 磁場ノイズを用いた自己位置推定法の有用性検証とそれに基づく自律移動法に関する考察, 日本ロボット学会学術講演会, 2014

⑪ 赤井直紀, 山内健司, 山本条太郎, 佐藤圭, 宇内隆太郎, 井上一道, 尾崎功一, 広域空間の磁場地図生成法, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2014

⑫ 柿木泰成, 井上一道, 赤井直紀, 宇内隆太郎, 山内健司, 山本条太郎, 佐藤圭, 米山翔悟, 尾崎功一, 機能性を有する移動ロボットの外観設計, 第15回計測自動制御学会

システムインテグレーション部門講演会論文集, 2014

⑬ Naoki Akai, Koichi Ozaki, A navigation method based on topological magnetic and geometric maps for outdoor mobile robots, International Symposium on System Integration, 2015

⑭ Naoki Akai, Koichi Ozaki, Gaussian processes for magnetic map-based localization in large-scale indoor environments, International Symposium on System Integration, 2015

⑮ 赤井直紀, 尾崎功一, 環境磁場を用いた移動ロボットの軌跡推定と環境地図構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015

⑯ 赤井直紀, 尾崎功一, 磁場の実験的解析と自律移動法への応用, 日本ロボット学会学術講演会, 2015

⑰ 赤井直紀, 米山翔悟, 柿木泰成, 尾崎功一, つくばチャレンジのタスク簡略化とそれに基づくナビゲーション戦略, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

※2008年5月30日～2010年6月14日(研究期間前)において5件の出願を行った。

○取得状況(計4件)

名称: 自律移動方法及び自律移動体

発明者: 尾崎功一

権利者: 国立大学法人 宇都宮大学

種類: 特許

番号: 5334198

取得年月日: 2013年11月6日

国内外の別: PCT出願

他関連特許3件

〔その他〕

計測・ロボット工学研究室

<https://ir.ics.utsunomiya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 功一 (OZAKI, Koichi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60282381