

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年5月24日現在

機関番号：34310
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2011～2013
課題番号：23560305
研究課題名（和文） パーソナルモビリティロボットのためのディペンダブル走行環境
センシングシステム
研究課題名（英文） Dependable environment sensing system for personal mobility robot

研究代表者
橋本 雅文 (HASHIMOTO, Masafumi)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号：10145815
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）4,000,000円、（間接経費）1,200,000円

研究成果の概要（和文）：

高齢者や障がい者の運転操作を支援して、移動支援ロボットやパーソナルモビリティ・デバイスによる安心快適モビリティ実現のための基礎研究として、自車の車載センサからの情報のみならず周囲を走行する他のロボットからのセンシング情報と連携することで、①オクルージョンや死角が頻繁に生じる環境下においても、移動物体（移動障害物）を高精度に追跡し、②センサ異常時でも移動物体追跡機能を維持するディペンダビリティの高い移動物体センシングシステムを構築し、③移動ロボットへの実装と特性評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

As a fundamental study to achieve safe and comfortable mobility using personal mobility robots and devices for the disabled and elderly, we ① studied in tracking of moving objects, such as people, cars, and bicycles, by fusing sensor data from multiple robots located in vicinity, even in environments where occlusions often occur, ② improved the dependability of the tracking system so that it can maintain accurate tracking even when sensor anomalies occurs, and ③ evaluated the proposed tracking system through simulations and experiments using mobile robots' platform equipped with laser scanner.

研究分野：ロボティクス，メカトロニクス，知覚情報処理

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：パーソナルモビリティ，移動ロボット，マルチロボット，移動物体追跡，レーザスキャナ，センサフュージョン，ベイズフィルタ

1. 研究開始当初の背景

移動支援ロボットやパーソナルモビリティ・デバイスなど、ユーザの運転操作を支援して安心快適なモビリティを可能とするパーソナルモビリティの研究が精力的に進められるようになってきた。超高齢社会の到来が間近い日本では、成人・健常者だけでなく高齢者や障がい者のモビリティに寄与できるインテリジェントなパーソナルモビリティシステムの開発が急務である。

安心快適な移動支援には、走行環境情報を多様な状況下においても信頼性高く認識できるセンシング技術の確立が重要な課題のひとつである。申請者らはこれまで走行環境（静止障害物，移動障害物）の認識やセンサ故障診断に関する研究を実施してきた。

移動ロボットやITSの分野において、ビジョンやレーザレーダ（レーザスキャナ）によ

る走行環境センシングについては多くの研究がなされており、静止障害物の認識技術は成熟しつつあるものの、移動障害物（移動物体）の認識については表層的な議論に留まっているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、複数ロボットの車載センサ情報の連携・協調に基づく環境認識、特に本質的な議論が不十分となっている移動物体センシングに焦点を絞り、以下を行う。

- (1)車載センサ情報と周辺ロボットからのセンサ情報との連携・協調による移動物体認識（追跡）システムの構築
- (2)センサ故障に頑強なフォールトトレラントセンシングシステムの構築
- (3)実験プラットフォームの構築と評価実験

3. 研究の方法

(1) 車載センサ情報と周辺ロボットからのセンサ情報との連携・協調による移動物体追跡システムの構築

① 歩行者追跡

各ロボットは自車の環境認識センサ（レーザスキャナなど）情報から占有グリッド法により歩行者を検出し、追跡する。追跡のモードを単独追跡と協調追跡の2つに分類する。

a) 単独追跡：図1のロボット3のように、単独追跡は、他ロボットとネットワークを介して情報交換が不可能な状況下での追跡である。追跡はカルマンフィルタや **Interacting multiple model (IMM)** 法のベイズフィルタを用いる。ベイズフィルタにより一時的なオクルージョンが生じた移動物体に対しても予測を行うことで追跡を継続できるが、各ロボットは個々の追跡情報のみで追跡を行うため、センサ視野外へ移動した歩行者や障害物による長時間のオクルージョンに対応することが困難である。

なお、検出された歩行者と追跡中の歩行者との対応付けは **Global nearest neighbor (GNN)** 法を用いる。また、誤追跡を軽減するため、ルールベースな追跡管理法を導入する。

b) 協調追跡：図1中のロボット1, 2のように、協調追跡は他ロボットとネットワークを介して情報交換が可能な状況下での追跡を意味する。ロボット間で情報共有が可能であるため、センサ視野外の追跡情報を得ることができ、オクルージョンへの対応が容易になる。協調追跡では、追跡情報を共有するため、他ロボットの追跡情報と自車の追跡情報との対応付けを **GNN** 法により行う。そして、**Covariance Intersection** 法により分散的に情報を統合する。

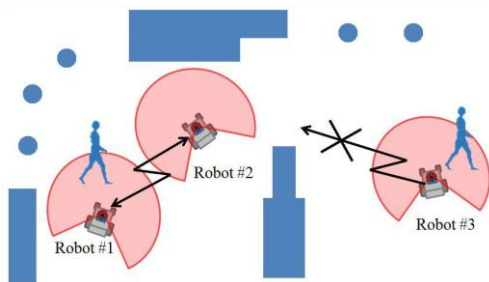


図1 歩行者追跡モード

② 多様な大きさの移動物体追跡

①では、追跡対象の移動物体として歩行者のみを対象とし、それを質点として取り扱った。しかし、実世界では移動物体は歩行者だけでなく二輪車や自動車など、多様な大きさの物体が存在する。それらを追跡するには移動物体を大きさのある剛体として取り扱い、移動物体の姿勢とともに大きさを推定することが必要となる。

多様な大きさの移動物体追跡システムの構成を図2に示す。各ロボットは車載センサにより環境をセンシングし、占有グリッド法を用いて移動物体を検出する。そして、移動物体に関するセンサ観測値情報をサーバに送信する。サーバでは各ロボットから送信されてきた移動物体に関するセンサ観測値をクラスタリングして、移動物体を追跡(大きさと位置、速度の推定)し、その追跡情報を各ロボットに返信する。

本研究では追跡物体の形状を幅 W 、長さ L を持つ長方形で表現する。図3に示すように、追跡物体の機首方向を y_v 軸とする x_v, y_v 座標系を定義し、各軸に対するセンサ観測値の最大値と最小値の差より現時刻における追跡物体の幅 W_{meas} 、長さ L_{meas} を算出する。そして、追跡物体の大きさを次式で推定する。

$$\begin{cases} W_k = W_{k-1} + G(W_{meas} - W_{k-1}) \\ L_k = L_{k-1} + G(L_{meas} - L_{k-1}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $k, k-1$ は時間ステップ、 G はゲイン。

式(1)で推定した幅 W 、長さ L の長方形の重心を物体代表点とし、その物体代表点の位置情報を用いて、一定速度モデルに基づくカルマンフィルタや **IMM** 法のベイズフィルタにより移動物体の姿勢(位置・速度)を推定する。なお、誤追跡を軽減するために追跡管理法を導入する。

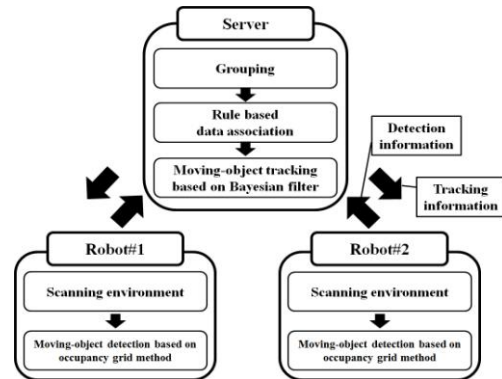


図2 協調追跡

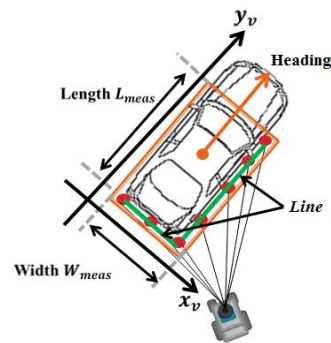


図3 大きさ推定

(2) センサ故障に頑強なフォールトトレラントセンシングシステムの構築

① センサの自己診断

環境認識センサ情報に基づくスキャンマッチングにより車体速度を推定する際、センサが故障するとスキャンマッチングが困難となる。そこで、ICP(Iterative Closest Point)における評価規範

$$J_{LS} = \sum_{i=1}^{361} \{q_i - (Rp_i + T)\}^2 \quad (2)$$

が閾値以上になった場合、センサ故障と判断する。

多数の移動物体が走行する動的環境下では上式の評価値が大きくなり、誤診が生じる可能性がある。そこで、移動物体追跡システムにおける占有グリッド法をもとに静止物体を検出し、それに対してスキャンマッチングを行うことで故障の誤診を軽減する。

② SLAM と GPS との融合によるフォールトトレラント自己姿勢認識

移動物体追跡における占有グリッド法において、センサ観測値を占有格子地図にマッピングしたり、複数のロボットによる協調追跡を行うには、グローバル座標系でのロボットの自己姿勢を正確に認識することが必要となる。

屋外環境での自己姿勢認識としてGPSの使用が一般的であるが、市街地環境では電波遮断やマルチパスの影響により自己姿勢認識精度が劣化する。そこで本研究では、GPSとSLAMを融合して自己姿勢認識を行う。これにより、場所依存のない移動物体追跡システムを実現できる。なお、SLAMとしては屋外環境に存在する樹木、ポール、柱などの円柱物体や建物の角などを点ランドマークとしたEKF-SLAMを用いる。

自己姿勢推定システムの構成を図4に示す。ロボットは内界センサ、GPS、LSによりセンサ情報を取得し、それをもとに高精度な自己姿勢を推定し、ローカル地図を作成する。さらに、両ロボットのローカル地図を統合しグローバル地図を作成することで、各ロボットの姿勢推定精度を高める。

SLAM と GPS の統合では、まず、GPS における HDOP (Horizontal Dilution Of Precision) の値と観測衛星数により GPS データがコンシステントかどうかをチェックする。HDOP が 4 以下かつ、GPS の観測衛星数が 5 以上であれば GPS データは信頼できるとして、GPS によりロボットの自己姿勢を更新する。次に SLAM により自己姿勢とランドマーク位置を観測更新する。GPS データが信頼できない場合は、SLAM で作成したグローバル地図をもとに自己姿勢を認識する。

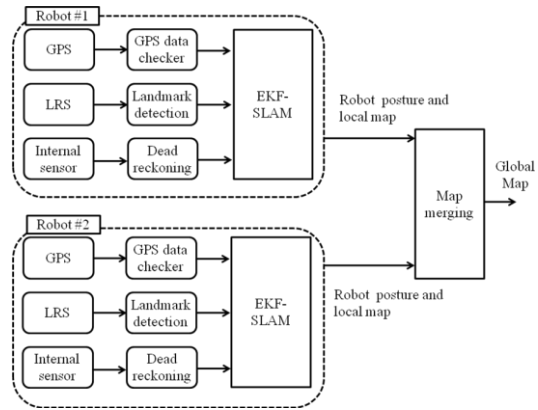


図4 自己姿勢認識システムの構成

(3) 実験プラットフォームの構築

試作した移動ロボットの外観を図5に示す。ロボットは左右独立駆動輪タイプで、内界センサとして車輪エンコーダ、光ファイバージャイロを搭載している。環境認識センサとして車体前部にレーザスキャナ(LS, SICK社製LMS100)を地上より高さ0.78[m]に設置している。LSにより視野角270[deg]、距離20[m]内の物体距離をTime-of-flight法により計測する。また、ロボットはRTK-GPS(NovAtel社製GPS-702-CG)を搭載している。

各ロボットは無線LANによりロボット相互、サーバとの通信が可能である。



図5 移動ロボット

4. 研究成果

(1) 車載センサ情報と周辺ロボットからのセンサ情報との連携・協調によるディペンダブルな歩行者追跡

歩行者追跡手法とフォールトトレラント自己姿勢認識手法とを統合し、実験プラットフォームに実装して評価実験を行った。

図6の環境において、2台のロボットにより3人の歩行者を追跡する。図7にロボットの移動経路を、図8に人物の移動経路を示す。ロボットは、移動中、自然ランドマークとして樹木やポール等、計7個が観測でき、それをもとにSLAMを実行し、グローバル地図を作製している。

図9に推定した人物の走行軌跡を示す。これより、単独追跡(b)に比べて、協調追跡(a)では歩行者が常時追跡できている。

図10にロボットの自己姿勢推定精度の人物追跡精度への影響を示す。これより、GPSデータが受信できる場合は追跡誤差が小さく、GPSデータが途絶えた場合でもSLAMに切替えることで追跡精度が維持できることが分かる。

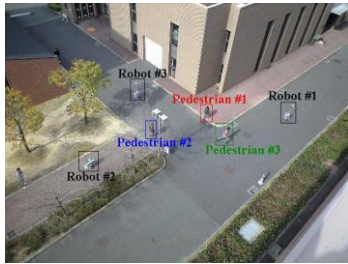


図6 実験環境

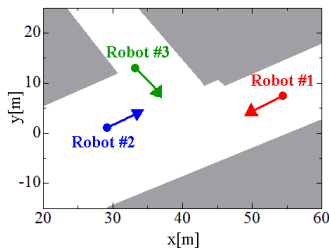


図7 ロボットの移動経路

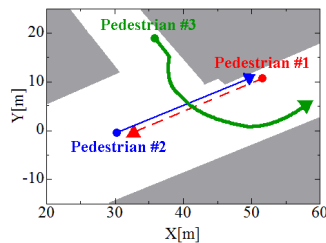
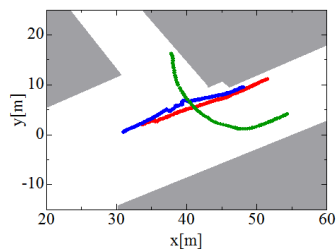
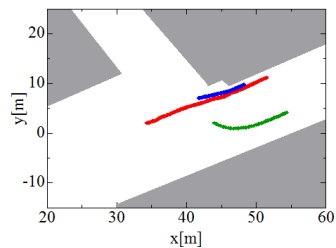


図8 人物の移動経路



(a) 協調追跡



(b) 単独追跡 (ロボット1)

図9 人物の推定走行軌跡

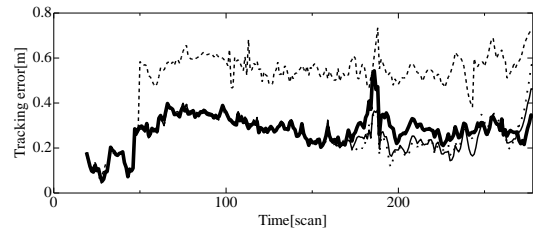


図10 自己姿勢推定精度の人物追跡精度への影響
(点線:GPSのみ使用, 細線:GPSとSLAMの融合, 太線:50スキャンまではGPSとSLAMの融合, 50スキャン以降はSLAMのみ使用, 破線:50スキャンまではGPSのみ使用, 50スキャン以降はデッドレコニングのみ使用)

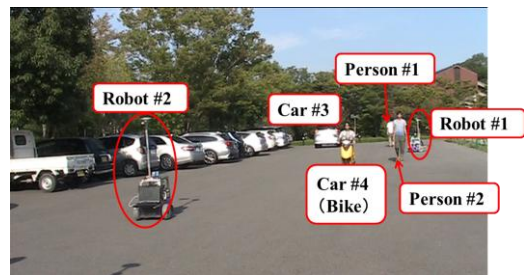


図11 実験環境

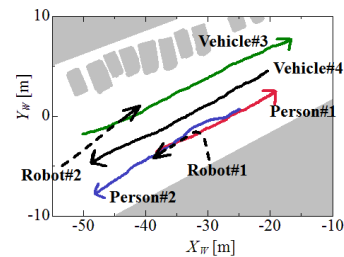
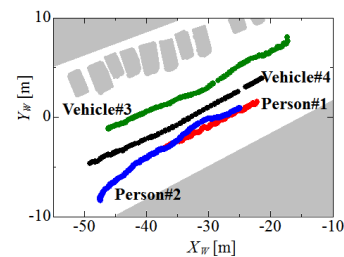
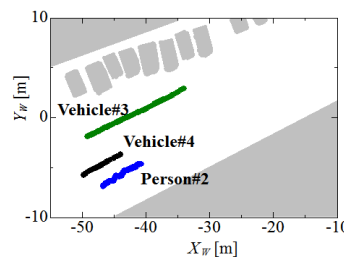


図12 ロボットと移動物体の移動経路



(a) 協調追跡



(b) 単独追跡 (ロボット1)

図13 移動物体の推定走行軌跡

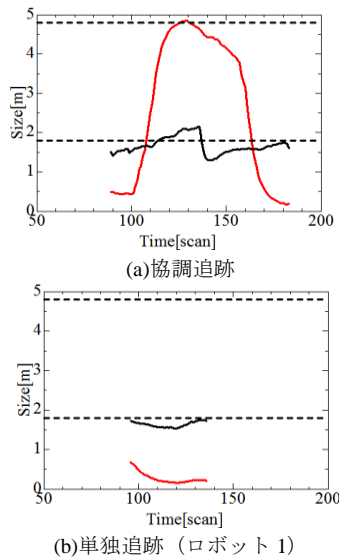


図 14 自動車の大きさ推定結果

(赤(黒)色実線:長さ(幅)推定結果, 破線:長さ・幅の真値)

(2) 車載センサ情報と周辺ロボットからのセンサ情報との連携・協調による多様な移動物体追跡

多様な大きさの移動物体追跡手法を実験プラットフォームに実装して評価実験を行った。図 11 の環境において、2 台のロボットにより歩行者 2 人、二輪車 1 台、自動車 1 台を追跡する。図 12 にロボットと移動物体の移動経路を示す。

図 13(a) に協調追跡により推定した移動物体の走行軌跡を、図 14(a) に自動車に対する大きさ推定結果を示す。比較のため、図 13(b)、14(b) にロボット 1 による単独追跡の結果を示す。これより、歩行者、二輪車、自動車を追跡でき、また、自動車の大きさも推定できているのが分かる。

本研究課題では、移動物体（移動障害物）に関して、これまで議論が未熟であった、①オクルージョンの影響を受けずに移動物体認識が可能、②運動状況の急変に影響を受けずに移動物体認識が可能、③センサ故障の影響を受けずに移動物体認識を可能とする、④高いディペンダビリティを有する移動物体追跡システムを確立した。この課題の達成により、パーソナルモビリティのみならず、人間との共存を前提としたロボティクスや ITS における安全・ディペンダブル RT 分野の発展・進展に寄与できる。

本研究で提案した歩行者追跡システムは情報統合に関して分散構造を有していることからシステム故障に対して頑強である。他方、自動車、二輪車等の移動物体追跡システムは、情報をサーバに集約する集中構造となっていることから、歩行者追跡システムと比

較してサーバ故障に脆弱であるとともに、ロボットの台数が増えるにつれて、サーバへの負荷が大きくなる。そこで、システムのディペンダビリティや実時間性をより確保するためのサーバとロボットとの情報処理分散の最適化が今後の課題として残されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Tomoya Suzuki, Masafumi Hashimoto, Takuya Kanehira and Kazuhiko Takahashi, Laser-Based Road Recognition for a Smart Electric Wheelchair, The Science and Engineering Review of Doshisha University, 54 巻, pp. 43-52, 2013, 査読有
- ② Tomoki Konda, Azusa Nishio, Masafumi Hashimoto, and Kazuhiko Takahashi, Laser/Vision-Based Tracking of People with Sudden Changes in Motion, Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII2012), pp. 416-421, 2012, 査読有
- ③ Kei Kakinuma, Masafumi Hashimoto, and Kazuhiko Takahashi, Outdoor Pedestrian Tracking by Multiple Mobile Robots Based on SLAM and GPS Fusion, Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII2012), pp. 422-427, 2012, 査読有
- ④ Masataka Ozaki, Kei Kakimuma, Masafumi Hashimoto and Kazuhiko Takahashi, Laser Based Pedestrian Tracking in Outdoor Environments by Multiple Mobile Robots, Sensors, 12 巻, pp.14489-14507; doi:10.3390/s121114489, 2012, 査読有
- ⑤ 山本学史, 橋本雅文, 菅沼直樹, 高橋和彦, 車載マルチレイザレーダによる移動物体の姿勢・大きさ推定法, 同志社大学理工学研究所報告, 53 巻, pp. 135-141, 2012, 査読有
- ⑥ 橋本雅文, 尾崎将崇, 横山 巧, 高橋和彦, マルチ移動ロボットによるレーザベースト歩行者追跡, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻, pp.220-234, 2012, 査読有
- ⑦ 橋本雅文, 根田知樹, 白 志濤, 高橋和彦, 2 層レーザレンジセンサによる急加減速を伴う複数人物の検出・追跡, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻, pp.138-150, 2012, 査読有
- ⑧ Kei Kakinuma, Masataka Ozaki, Masafumi Hashimoto, Takumi Yokoyama, and Kazuhiko Takahashi, Laser-Based Pedestrian Tracking by Multiple Mobile Robots using Outdoor SLAM, Proc. of 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011), pp. 998-1003, 2011, 査読有
- ⑨ Masataka Ozaki, Masafumi Hashimoto, Takumi Yokoyama and Kazuhiko Takahashi,

Laser-Based Pedestrian Tracking by Multi-Mobile Robots in Outdoor Environments, Proc. of the 37th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), pp. 156-161, 2011, 査読有

- ⑩ Naoki Suganuma, and Takaaki Kubo, Fast Dynamic Object Extraction using Stereovision based on Occupancy Grid Maps and Optical Flow, Proc. of 2011 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011), pp.978-983, 2011, 査読有
- ⑪ Masafumi Hashimoto, Masataka Ozaki, Takumi Yokoyama, and Kazuhiko Takahashi, Laser-Based People Tracking by Multiple Mobile Robots, Proc. of 2011 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011), pp.37-42, 2011, 査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① 橋本雅文, マルチレーザスキャナによる歩行者・移動物体追跡に関する研究, アドバンティ2013シンポジウム, 2013年12月, 金沢
- ② 泉 竜之輔, 屋外におけるマルチ移動ロボットによるレーザベースな移動物体大きさ・姿勢推定法, 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, 2013 年 12 月, 神戸
- ③ 泉 竜之輔, マルチ移動ロボットによるレーザベースな移動物体大きさ・姿勢推定法, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013 年 9 月, 東京
- ④ 羽倉友樹, Occupancy Grid Maps に基づく移動物体の検出と追跡, 自動車技術会春季大会, 2013 年 5 月, 横浜
- ⑤ 菅沼直樹, Grid-Based SLAM に基づく移動物体の検出と追跡, アドバンティ2012シンポジウム, 2012年11月, 千葉
- ⑥ 泉 竜之輔, マルチ移動ロボットによるレーザベースな移動物体大きさ・姿勢推定, アドバンティ2012シンポジウム, 2012年11月, 千葉
- ⑦ 橋本雅文, マルチ移動ロボットによるレーザベースな歩行者追跡, アドバンティ2012シンポジウム, 2012年11月, 千葉
- ⑧ 橋本雅文, 車載マルチレイザレーザレーダによる移動物体の姿勢・大きさ推定法, 2012年自動車技術会春季大会学術講演会, 2012 年 5 月, 横浜
- ⑨ 坂 元希, 一般道路におけるステレオビジョンを用いた自動車のエゴモーション推定, 第 12 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, 2011 年 12 月, 京都

- ⑩ 根田知樹, レーザとビジョンによる急加減速運動を行う複数人物の三次元追跡, 第 12 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, 2011 年 12 月, 京都
- ⑪ 魚住剛弘, 東京モータショー2011 Smart Mobility City テストライド金沢大学出展車両の概要 ~ 全方位型レーザーを用いた障害物検出 ~, ADVANTY2011 シンポジウム, 2011 年 11 月, 京都
- ⑫ 柿沼 敬, 屋外EKF-SLAMを用いた複数移動ロボットによるレーザベースな歩行者追跡, アドバンティ 2011 シンポジウム, 2011 年 11 月, 京都
- ⑬ 尾崎将崇, 屋外環境でのマルチ移動ロボットによるレーザベースな歩行者追跡, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 2011年9月, 東京
- ⑭ 根田知樹, レーザとビジョンによる急加減速運動を行う人物の三次元追跡, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011年5月, 岡山
- ⑮ 尾崎将崇, マルチ移動ロボットによる屋外環境でのレーザベースな歩行者追跡, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011年5月, 岡山

[その他]

- ① 安全な人の移動を実現するための人と環境が協調した認識技術, プロジェクトNEXT 関西発選りすぐり大学技術集, 近畿経済産業局, <http://www.kansai.meti.go.jp/3jisedai/project-next/daigakuseeds/daigakuseeds.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 雅文 (HASHIMOTO, Masafumi)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 10145815

(2)研究分担者

菅沼 直樹 (SUGANUMA, Naoki)
金沢大学・機械工学系・講師
研究者番号: 50361978

(3)連携研究者

高橋 和彦 (TAKAHASHI, Kazuhiko)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 90332808