



نقشه برداری و مکان یابی همزمان با استفاده از داده لیزر و روش نقشه برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی

مرضیه زمانی علویجه¹، شهرام هادیان جزی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8174673441، s.hadian@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 بهمن 1394

پذیرش: 30 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 02 تیر 1395

کلید واژگان:

مکان یابی و نقشه برداری همزمان

الگوریتم سریع بدون ردیابی

لیزر

انطباق پویشی

چکیده

مکان یابی و نقشه برداری همزمان یکی از مسائل بنیادی در رباتیک است و تاکنون الگوریتم های بسیاری از جمله الگوریتم نقشه برداری سریع که بسیار پرکاربرد است و الگوریتم نقشه برداری سریع بدون ردیابی که جدیدتر است، برای حل این مسئله به کار گرفته شده اند. اگرچه در مقایسه های علمی، عملکرد این الگوریتم بهتر از الگوریتم سریع ارزیابی شده است، هنوز ظرفیت های بررسی نشده زیادی در رابطه با این الگوریتم وجود دارد. لذا در این مقاله به موضوع ارایه اصلاحات برای بهبود الگوریتم سریع بدون ردیابی و بررسی عملکرد آن پرداخته شده است. یکی از راه های افزایش دقت تخمین موضع ربات، مقایسه و تطبیق دو اندازه گیری متوالی و اصلاح موضع ربات به نحوی که بهترین تطابق میان دو اندازه گیری برقرار شود، است. این روش که انطباق پویشی نامیده می شود برای بهبود عملکرد الگوریتم ها موثر بوده ولی تاکنون برای الگوریتم سریع بدون ردیابی مورد آزمون قرار نگرفته است. در این مقاله برای اولین بار از ترکیب الگوریتم سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی برای مکان یابی و نقشه برداری همزمان استفاده می شود. برای ارزیابی تاثیر انطباق پویشی، این الگوریتم روی دو مجموعه داده لیزر به دست آمده در محیط شبیه سازی و آزمایش های عملی، پیاده سازی و نتایج با حالت بدون انطباق پویشی مقایسه می شوند. نتایج مقایسه نشان می دهند که افزودن انطباق پویشی به الگوریتم سریع بدون ردیابی، دقت تخمین مسیر و دقت نقشه را به مقدار قابل ملاحظه ای بهبود می دهد. همچنین با بهبود سرعت الگوریتم انطباق داده، زمان اضافی لازم برای انجام انطباق پویشی جبران شده و سرعت کلی الگوریتم سریع بدون ردیابی بهبود یافت.

Simultaneous Localization and Mapping Using Laser Data and Unscented FastSLAM with Scan Matching

Marzieh Zamani Alavijeh, Shahram Hadian Jazi*

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 8174673441, Isfahan, Iran, s.hadian@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 February 2016
Accepted 19 May 2016
Available Online 22 June 2016

Keywords:

Simultaneous localization and mapping
Unscented FastSLAM algorithm
Laser
Scan Matching

ABSTRACT

Simultaneous localization and mapping (SLAM) is a fundamental problem in autonomous robotics. Many algorithms have been exploited to solve this problem, among these algorithms, FastSLAM is one of the most widely used and Unscented FastSLAM is one of the newest. Although in several scientific researches it is stated that Unscented FastSLAM outperforms FastSLAM, there are still unexamined potentials regarding Unscented FastSLAM. Therefore, this paper seeks to improve the overall performance of Unscented FastSLAM. Map accuracy and quality directly depend on the accuracy of localization and observations. In SLAM algorithms, robot pose is predicted using motion model, and then corrected using the difference between map features and recently observed features. Accuracy of pose estimation may improve by comparing two sequential observations and modifying robot pose to result in best match between them. This method is called scan matching and has been successfully combined with FastSLAM algorithm and some other SLAM algorithms not including Unscented FastSLAM. Therefore, this paper seeks to investigate the performance of Unscented FastSLAM combined with scan matching. Simulation results show that combining Unscented FastSLAM with scan match significantly improves accuracy of localization and mapping.

1- مقدمه

به خصوص مکان یابی و نقشه برداری همزمان¹ از محیط صورت گرفته است. در سال 1985 یکی از اولین تلاش ها برای انجام مکان یابی و نقشه برداری به صورت همزمان با استفاده از حسگر پویشگر لیزری و شفت انکودر و با توجه به عدم قطعیت های موجود در مسئله توسط چتیلا و همکارانش صورت گرفت

به دست آوردن مدل فیزیکی و تهیه نقشه محیط اطراف یکی از مسایل مهم و اساسی در رباتیک است و کاربردهای بسیاری از قبیل هدایت خودکار ربات، ردیابی و تشخیص اجسام و اشخاص و انجام عملیات جستجو و نجات دارد. طی ده سال گذشته پیشرفت چشمگیری در زمینه هدایت خودکار ربات و

¹ Simultaneous localization and mapping (SLAM)

[1]. در سال 1990 اسمیت و همکارانش برای اولین بار با استفاده از مشخصه‌های محیط به نقشه‌برداری پرداختند و از فیلتر کالمن¹ برای حل مسئله استفاده کردند [2].

در دهه گذشته تمرکز بسیاری از محققان بر روی یافتن راه‌حل‌های مناسب برای مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان در زمان واقعی بوده است. در این میان محبوب‌ترین روش‌ها برای مسئله مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان فیلتر کالمن توسعه‌یافته² [3] و فیلتر ذره راتو-بلک‌ولایزد³ بوده‌اند [4]. فیلتر کالمن توسعه‌یافته از تقریب خطی استفاده می‌کند و فرض می‌کند که تابع چگالی احتمال توزیع گوسی دارد. اما در تحقیقات مختلفی ثابت شده‌است که نقشه به‌دست آمده به این روش به دلیل خطای ناشی از خطی‌سازی چندان دقیق نیست و همچنین پیچیدگی محاسباتی این روش زیاد است و در زمان واقعی قابل اجرا نیست. تحقیقات بسیاری برای برطرف کردن این مشکلات صورت گرفته است.

در تلاش برای افزایش دقت مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان، فیلتر کالمن جدیدی تحت عنوان فیلتر کالمن ردیابی‌نشده⁴ معرفی شد که از تقریب خطی استفاده نمی‌کرد [5]. فیلتر کالمن ردیابی‌نشده از یک روش قطعی نمونه‌برداری استفاده می‌کند که متوسط و کواریانس تخمین‌ها را به‌دست می‌آورد. فیلتر کالمن ردیابی‌نشده به‌جای تابع غیرخطی سیستم، تابع چگالی احتمال را تخمین می‌زند و هرچقدر میزان غیرخطی بودن سیستم بیشتر باشد تخمین قابل اطمینان‌تری نسبت به فیلتر کالمن توسعه‌یافته ارایه می‌دهد اما پیچیدگی محاسباتی آن مشابه فیلتر کالمن توسعه‌یافته است. از طرف دیگر الگوریتم مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان سریع⁵، که از این به بعد به اختصار نقشه‌برداری سریع نامیده می‌شود، با به‌کارگیری هم‌زمان فیلتر ذره و فیلتر کالمن توسعه‌یافته حجم محاسبات را به‌طرز قابل توجهی نسبت به فیلتر کالمن توسعه‌یافته و فیلتر کالمن ردیابی‌نشده کاهش می‌دهد [6]. در نهایت الگوریتم مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان سریع بر مبنای فیلتر کالمن ردیابی‌نشده تحت عنوان مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان سریع بدون ردیابی⁶، که از این به بعد به اختصار نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی نامیده می‌شود، به‌عنوان یکی از جدیدترین روش‌های مطرح شده در زمینه مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان با بهره‌گیری از تخمین قابل اطمینان فیلتر کالمن ردیابی‌نشده، دقت را افزایش و حجم محاسبات را کاهش می‌دهد [7]. نشان داده شده‌است که نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی در مقایسه با روش‌های نقشه‌برداری سریع بر مبنای فیلتر کالمن توسعه‌یافته و نقشه‌برداری سریع⁷ از نظر دقت و کیفیت نقشه‌برداری عملکرد مطلوب‌تری دارد [8]. با وجود این برتری، هنوز ظرفیت‌های بررسی‌نشده زیادی در رابطه با الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی وجود دارد.

مکان‌یابی و نقشه‌برداری کاملاً به هم وابسته هستند. به این معنا که برای یافتن مکان دقیق ربات در یک محیط، نقشه صحیحی از محیط موردنیاز است و از طرف دیگر نقشه مجموعه‌ای از مشخصه‌های محیط است که مختصات این مشخصه‌ها نسبت به ربات اندازه‌گیری شده است و در نتیجه دقت نقشه به دقت مکان‌یابی ربات بستگی دارد و افزایش دقت تخمین موضع، نقش به‌سزایی در بهبود دقت و کیفیت نقشه دارد.

در الگوریتم‌های مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان موضع لحظه‌ای ربات با استفاده از مدل حرکت پیش‌بینی شده و سپس با استفاده از تفاوت ویژگی‌های ثبت شده در نقشه و ویژگی‌هایی که به‌تازگی مشاهده شده‌اند، اصلاح می‌شود. یکی از راه‌های افزایش دقت تخمین موضع ربات، مقایسه و تطبیق دو اندازه‌گیری متوالی و اصلاح موضع ربات به‌نحوی که بهترین تطابق میان دو اندازه‌گیری برقرار شود، است. این روش که انطباق پویشی⁸ نامیده می‌شود برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان نظیر نقشه‌برداری سریع موثر بوده است [9].

نتایج یک تحقیق نشان می‌دهد که انطباق پویشی می‌تواند برای مکان‌یابی با دقت مناسب حتی در محیط 3 بعدی مورد استفاده قرار گیرد [10]. همچنین در [11] از ترکیب انطباق پویشی و روش نقشه‌برداری سریع با اولویت مکان‌یابی نسبت به نقشه‌برداری برای پردازش داده لیزر استفاده شده و نتایج نشان‌دهنده بهبود مکان‌یابی بودند. در [12] یک روش هدایت سریع ربات ارایه شده که نقاط به‌دست‌آمده از هر پویش را ابتدا در سلول‌های نقشه شبکه‌بندی تصویر کرده و سپس مکان‌یابی دقیق به کمک الگوریتم انطباق پویشی انجام می‌شود. در [13] روش انطباق پویشی بهبود داده شده و برای پردازش ابرنقطه 3 بعدی مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود تاثیر انطباق پویشی در افزایش دقت مکان‌یابی، این روش تاکنون به همراه نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی مورد آزمون قرار نگرفته است. در این مقاله برای اولین بار از ترکیب روش نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی برای مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان استفاده می‌شود. برای ارزیابی تاثیر انطباق پویشی بر عملکرد نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی، این الگوریتم روی دو مجموعه داده لیزر به‌دست آمده در محیط شبیه‌سازی و همچنین در آزمایش عملی، پیاده‌سازی و نتایج آن با الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه (بدون انطباق پویشی) مقایسه می‌شوند. نتایج مقایسه نشان می‌دهند که افزودن انطباق پویشی به الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی، دقت تخمین مسیر و دقت نقشه را به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد. همچنین با بهبود سرعت الگوریتم انطباق داده، زمان اضافی لازم برای انجام انطباق پویشی جبران شده و سرعت کلی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی نیز بهبود می‌یابد.

2- ترکیب انطباق پویشی با نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی

الگوریتم تکرارشونده نزدیک‌ترین نقطه⁹، یکی از بهترین روش‌های انطباق پویشی برای هم‌تراز کردن دو مجموعه نقطه است و کاربرد زیادی در اصلاح موقعیت ربات با بهره‌گیری از مقایسه و انطباق دو پویش متوالی دارد. این الگوریتم با دو مجموعه نقطه و یک حدس اولیه برای انتقال بین آن‌ها آغاز می‌شود، سپس انتقال مکرراً با استخراج نقاط متناظر بین دو مجموعه و محاسبه خطای اختلاف این نقاط تصحیح می‌شود. برای تعیین حدس اولیه گزینه‌های متنوعی وجود دارد: مقادیر تصادفی، ردیابی مکان حسگر، جستجو برای نقاط متناظر بدون اعمال انتقال اولیه و یا گرفتن ورودی از کاربر. در این مقاله الگوریتم تکرارشونده نزدیک‌ترین نقطه که در [14] معرفی شده و کد آن توسط میان پیاده‌سازی شده [15,16]، به عنوان الگوریتم و کد مبنا مورد استفاده و بازنویسی قرار گرفته است. در این مقاله الگوریتم مکان حسگر که با استفاده از مدل حرکت ردیابی می‌شود و جابجایی حسگر به‌عنوان انتقال اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Kalman Filter (KF)

² Extended Kalman Filter (EKF)

³ Rao-Blackwellized Particle Filter (RBPF)

⁴ Unscented Kalman Filter (UKF)

⁵ FastSLAM (FS)

⁶ Unscented FastSLAM (UFS)

⁷ FastSLAM 2.0

⁸ Scan Matching

⁹ Iterative closest point (ICP)

اولیه (α_{init}) به صورت زیر تعیین می شود:

$$A = \{\alpha_i\} = \left\{ \alpha_{init} + k \frac{\pi}{180} \right\}; k = -15, -14, \dots, 14, 15 \quad (7)$$

با توجه به این که زاویه α_{init} یک زاویه تصادفی نیست و از رابطه (5) به دست آمده، برای جستجوی دقیق تر زاویه یک بازه 30 درجه ای، از 15 درجه قبل از زاویه α_{init} تا 15 درجه بعد از α_{init} ، کافی و مناسب است. زوایای آزمایشی در این بازه با اختلاف 1 درجه تعیین شده و مورد بررسی قرار می گیرند.

2- محاسبه و اعمال دوران α_i به پویش جدید

اعمال دورانی معادل هر زاویه α_i از مجموعه زوایای A به پویش جدید مطابق زیر صورت می گیرد:

$$R_{\alpha_i} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Z'_{new} = R_{\alpha_i} Z_{new} \quad (9)$$

3- تطابق پویش جدید دوران یافته (Z'_{new}) با پویش مبنا و استخراج نقاط متناظر

گام بعدی جستجوی نقاط متناظر بین پویش مبنا و پویش جدید (Z'_{new}) است که براساس معیار نزدیک ترین فاصله انجام می شود. ابتدا برای هر نقطه از پویش جدید، نزدیک ترین نقطه از پویش مبنا جستجو می شود و فاصله آن-ها محاسبه می گردد. این امکان وجود دارد که برای چندین نقطه از پویش جدید، یک نقطه از پویش مبنا یافت شود که در این صورت تنها جفت نقطه ای که کمترین فاصله را دارد حفظ شده و بقیه حذف می شوند. همچنین جفت نقطه هایی که فاصله آن ها بیشتر از حد مجاز، d_{max} باشد، حذف می شوند و در نهایت ماتریس مطابقت² (CM) مطابق زیر تشکیل می گردد:

$$CM = \begin{bmatrix} m_1 & n_1 & d_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_K & n_K & d_K \end{bmatrix} \quad (10)$$

هر سطر این ماتریس مربوط به یک تناظر بین پویش جدید و پویش مبنا است، یعنی نقطه m_1 از Z_{ref} متناظر با نقطه n_1 از Z_{new} است و d_1 فاصله میان این دو نقطه است.

به منظور راحتی در نوشتن ماتریس مطابقت به فرم ستونی زیر بازنویسی می شود:

$$CM = [M_{ref} N_{new} d]_{K \times 3} \quad (11)$$

4- محاسبه انتقال با استفاده از نقاط متناظر و اعمال انتقال به پویش جدید (Z'_{new})

بعد از اعمال دوران α_i ، با محاسبه تفاضل میانگین پویش مبنا و پویش جدید دوران یافته، مناسب ترین بردار انتقال T_i تعیین می شود:

$$T_i = \text{mean}(Z_{ref}(M_{ref})) - \text{mean}(Z_{new}(N_{new})) \quad (12)$$

تابع mean برای محاسبه نقطه میانگین مجموعه نقاط یک پویش به کار می رود.

سپس پویش جدید انتقال یافته، Z''_{new} ، از رابطه (13) به دست می آید:

$$Z''_{new} = Z'_{new} + T_i \quad (13)$$

5- تطابق پویش جدید دوران و انتقال یافته با پویش مبنا و استخراج نقاط متناظر

در این مرحله، ماتریس تطابق جدید مطابق مرحله 3 تشکیل می شود.

در این الگوریتم اطلاعات دو پویش لیزر¹ متوالی که در دستگاه مختصات کارتزین محلی ربات بیان شده اند با هم مقایسه می شوند. نزدیک ترین نقاط متناظر از دو پویش که فاصله آن ها از یک مقدار ثابت (براساس دقت زاویه و برد حسگر) کمتر باشد، به صورت دو مجموعه نقاط متناظر از دو پویش ذخیره می شوند. سپس نقاط ذخیره شده پویش جدید، مکرراً مورد انتقال های خطی و چرخشی قرار می گیرند و بعد از هر انتقال مجموعه نقاط متناظر باز محاسبه می شود و این چرخه تا زمانی که خطای انطباق به مقدار قابل قبولی برسد و یا تعداد تکرارها از حدی بیشتر شود، ادامه می یابد. در نهایت انتقال به دست آمده که بهترین انطباق میان دو پویش را نتیجه می دهد، جابجایی از موضع مبنا به موضع جدید را نشان می دهد. با اعمال این انتقال به موضع مبنا، موضع جدید با دقت خوبی به دست می آید. در اکثر موارد برای کاهش تکرارهای مورد نیاز، جابجایی به دست آمده از مدل حرکت به عنوان اولین انتقال مورد استفاده قرار می گیرد.

الگوریتم تکرارشونده نزدیک ترین نقطه در این مقاله مطابق مراحل زیر انجام می شود:

1- تعیین ورودی های الگوریتم

ورودی های الگوریتم عبارتند از دو پویش متوالی پویش مبنا و پویش جدید و همچنین انتقال اولیه.

پویش مبنا (Z_{ref}) و پویش جدید (Z_{new}) که به ترتیب در زمان های $t-1$ و t به دست آمده و نسبت به دستگاه مختصات کارتزین محلی ربات بیان می شوند:

$$Z_{ref} = \begin{bmatrix} x_1^{ref} & x_2^{ref} & \dots & x_K^{ref} \\ y_1^{ref} & y_2^{ref} & \dots & y_K^{ref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_{new} = \begin{bmatrix} x_1^{new} & x_2^{new} & \dots & x_L^{new} \\ y_1^{new} & y_2^{new} & \dots & y_L^{new} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در این جا هر جفت $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ موقعیت یک نقطه از محیط در دستگاه مختصات کارتزین محلی ربات است. K تعداد نقاط مربوط به پویش مبنا و L تعداد نقاط پویش جدید است. تفاوت این دو عدد مشکلی در الگوریتم ایجاد نمی کند، چرا که الگوریتم تنها با جفت نقاط متناظر سروکار دارد.

بردار انتقال اولیه از تفاضل موضع مبنا و موضع جدید محاسبه می شود. از آن جا که موضع ربات در زمان $t-1$ در مرحله قبل اصلاح شده است، به عنوان موضع مبنا (X_{ref}) و موضع ربات در زمان t به عنوان موضع جدید (X_{new}) خوانده می شوند:

$$X_{ref} = [x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref}]^T \quad (3)$$

$$X_{new} = [x_{new}, y_{new}, \theta_{new}]^T \quad (4)$$

که در این رابطه x, y موقعیت ربات و θ جهت گیری ربات است. با توجه به دو بعدی بودن مسئله، انتقال نیز همانند موضع، شامل یک زاویه دوران α و یک بردار جابجایی $T = [x, y]$ است که از روابط زیر محاسبه می گردند:

$$\alpha_{init} = \theta_{new} - \theta_{ref} \quad (5)$$

$$T_{init} = [x_{init}, y_{init}] = [x_{new} - x_{ref}, y_{new} - y_{ref}] \quad (6)$$

در این الگوریتم تنها از دوران اولیه α_{init} استفاده شده و T_{init} در مرحله بعد با استفاده از همین دوران محاسبه می شود، لذا تنها α_{init} به عنوان انتقال اولیه به الگوریتم وارد می شود. مجموعه زوایای دوران آزمایشی حول زاویه دوران

² Correspondence Matrix

¹ Laser Scan

یکی از متداول ترین روش های ارتباط داده، روش بیشترین احتمال است. در این روش ابتدا ویژگی های نقشه که در مختصات جهانی ذخیره شده اند، در دستگاه کارترین محلی ربات در زمان t بیان می شوند تا قابل مقایسه با مشاهده های جدید باشند. سپس برای هر ویژگی از پویش Z_{new} شبیه ترین ویژگی نقشه را جستجو کرده و چنانچه اختلاف این دو ویژگی کمتر از آستانه پذیرش تناظر و مقدار تابع احتمال قابل قبول باشد، متناظر شناخته می شوند و اگر مقدار تابع احتمال بالاتر از آستانه رد تناظر باشد، به عنوان یک ویژگی جدید ثبت می شود.

برای پیاده سازی این روش معمولاً از کد نوشته شده توسط بیلی [17] استفاده می شود که برای یافتن ویژگی متناظر احتمالی با هر مشاهده، فاصله تمام ویژگی های نقشه با آن مشاهده را محاسبه کرده و نزدیک ترین فاصله را ذخیره می کند و سپس تابع احتمال را محاسبه کرده و براساس مقدار آن ویژگی را به عنوان شناخته شده، جدید و یا نامعلوم طبقه بندی می کند.

مشکل این روش این است که محاسبه فاصله تعداد زیادی زوج ویژگی مشاهده و نقشه، بسیار زمان بر است. به طور مثال فرض کنید که تعداد 300 ویژگی در نقشه ذخیره شده باشند و در پویش جدید نیز 100 مشاهده ثبت شده باشد، چنانچه قرار باشد با این روش نزدیک ترین ویژگی متناظر با هر مشاهده پیدا شود، باید 100×300 یعنی 30000 محاسبه فاصله انجام شود. از طرف دیگر به دلیل همین تعداد زیاد محاسبات، زمان قابل ملاحظه ای صرف مرحله ارتباط داده ها می شود. در واقع مرحله ارتباط داده ها، با اختلاف زیادی، زمان برترین مرحله از الگوریتم های نقشه برداری سریع و نقشه برداری سریع بدون ردیابی است.

در این تحقیق تلاش شده تا با انجام اصلاحاتی فرآیند ارتباط داده ها با دقتی مشابه ولی در زمانی کمتر و بدون تکرار بررسی شود. برای این منظور، برای بررسی نزدیک ترین فاصله، ابتدا از دستور `dsearchn` در نرم افزار متلب³ استفاده شده است که با مقایسه دو مجموعه نقاط دو بعدی، برای هر نقطه از مجموعه دوم، نزدیک ترین نقطه از مجموعه اول را یافته و فاصله آنها را نیز محاسبه می کند. نقاط مجموعه دوم غیر تکراری هستند ولی ممکن است برای چندین نقطه از این مجموعه، یک نقطه مشترک از مجموعه اول به عنوان نزدیک ترین نقطه یافته شود. در این صورت، جفت نقطه ای دارای کمترین فاصله حفظ شده، و بقیه حذف می گردند. سپس تابع احتمال برای تناظرهای باقی مانده محاسبه می شود و سایر مراحل پیاده سازی آقای بیلی انجام می شوند. متوسط زمان انجام هر مرحله ارتباط داده با این روش (در شرایط مشابه) 0.02 ثانیه است که در حدود 50 بار سریع تر از روش اول است.

الگوریتم ارتباط داده مورد استفاده در این مقاله دارای مراحل زیر است:

1- تعیین ورودی ها: ویژگی های ذخیره شده در نقشه، Z_{map} ، و پویش جدید، Z_{new}

2- جستجوی نزدیک ترین نقطه از ویژگی های نقشه برای هر نقطه از پویش جدید با استفاده از دستور `dsearchn`:

$$[corr, D] = dsearchn(Z_{map}, tri, Z_{new}) \quad (18)$$

در این رابطه، $[corr, D]$ ماتریسی مشابه ماتریس CM در رابطه (10) است و هر سطر corr مربوط به اندیس یک جفت نقطه متناظر بین پویش جدید و نقشه و همان سطر از D فاصله بین دو نقطه است.

همچنین `tri` با استفاده از دستور `delaunay` در نرم افزار متلب محاسبه می شود:

6- محاسبه و ذخیره خطای انتقال برای نقاط متناظر

برای ارزیابی دقت انطباق دو پویش در هر تکرار و برای هر α_i خطای تناظر که معادل مجموع فاصله های جفت نقطه های متناظر تقسیم بر تعداد آن- هاست محاسبه می شود:

$$error_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K d_j \quad (14)$$

7- تکرار الگوریتم برای کمینه کردن خطا

مراحل 2 تا 6 برای تمام مجموعه زوایای دوران آزمایشی α_i انجام شده و دوران و انتقالی که کمترین خطا را داشته باشد، انتخاب می شود:

$$T_{icp} = T_j; \alpha_{icp} = \alpha_j \quad (15)$$

ز اندیس کمترین خطای به دست آمده است و در نتیجه α_j و T_j مناسب ترین دوران و انتقال هستند.

8- محاسبه موضع اصلاح شده ربات

موضع اصلاح شده از اعمال دوران و انتقال بهینه به موضع جدید ربات به دست می آید:

$$R_{\theta_{new}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{new} & -\sin \theta_{new} \\ \sin \theta_{new} & \cos \theta_{new} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$X'_{new} = \begin{bmatrix} X_{new}, Y_{new} \end{bmatrix}^T + R_{\theta_{new}} T_{icp} \quad (17)$$

شبه کد الگوریتم انطباق پویا بصورت زیر است:

ICP ($Z_{ref}, Z_{new}, \alpha_{init}$)

Generate sample A

$$A = \{\alpha_i\} = \left\{ \alpha_{init} + k \frac{\pi}{180} \right\}; k = -15, -14, \dots, 14, 15$$

for $\alpha_i \in A$ do

$$R_{\alpha_i} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}; Z'_{new} = R_{\alpha_i} Z_{new}$$

Calculate Correspondence Matrix

$$T_i = \text{mean}(Z_{ref}(M_{ref})) - \text{mean}(Z_{new}(N_{new}))$$

$$Z''_{new} = Z'_{new} + T_i$$

Recalculate Correspondence Matrix

$$error_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K d_j$$

endfor

$$j = \arg \min \{error_i, i\}$$

$$T_{icp} = T_j; \alpha_{icp} = \alpha_j$$

$$R_{\theta_{new}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{new} & -\sin \theta_{new} \\ \sin \theta_{new} & \cos \theta_{new} \end{bmatrix}$$

$$X'_{new} = \begin{bmatrix} X_{new}, Y_{new} \end{bmatrix}^T + R_{\theta_{new}} T_{icp}$$

همان طور که در شبه کد نیز مشخص است پیچیدگی محاسباتی الگوریتم به تعداد زوایای مورد بررسی در مجموعه زوایای دوران آزمایشی بستگی دارد. لذا اگر تعداد این زوایا K باشد، پیچیدگی محاسباتی $O(K)$ است. بنابراین هرچه بازه زوایای مورد جستجو بزرگتر و دقت بیشتر باشد، الگوریتم پیچیده تر و زمان برتر خواهد بود.

3- ارتباط داده ها¹ به روش بیشترین احتمال²

ارتباط داده ها فرآیند بررسی ارتباط میان ویژگی هایی که به تازگی مشاهده شده اند با ویژگی های ذخیره شده در نقشه است. تشخیص درست این که کدام ویژگی ها جدید هستند و کدام ویژگی ها قبلاً مشاهده شده اند و این ویژگی های مشاهده شده با کدام ویژگی های نقشه متناظر هستند، برای به روز رسانی موضع ربات و تهیه نقشه محیط ضروری است.

¹ Data Association

² Maximum Likelihood (ML)

³ MATLAB

برای بررسی تاثیر انطباق پویایی روی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی، باید ابتدا الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور از کد نوشته شده توسط کیم با همان الگوریتم ارتباط داده اولیه استفاده شده و تنها پارامترهای آن تنظیم شده‌اند و قابلیت تولید نقشه شبکه‌بندی به آن اضافه شده‌است. "شکل 2" نقشه ویژگی‌مبنا به همراه مسیر واقعی و مسیر تخمین‌زده شده ربات و "شکل 3" نقشه شبکه‌بندی محیط را نشان می‌دهد.

به دلیل خطای تخمین مسیر، مرزها دارای خطا بوده و زاویه‌دار هستند. در برخی نواحی، خطای موضع به قدری زیاد بوده که موجب تکرار یک وجه از محیط در نقشه ویژگی‌مبنا و شبکه‌بندی شده است.

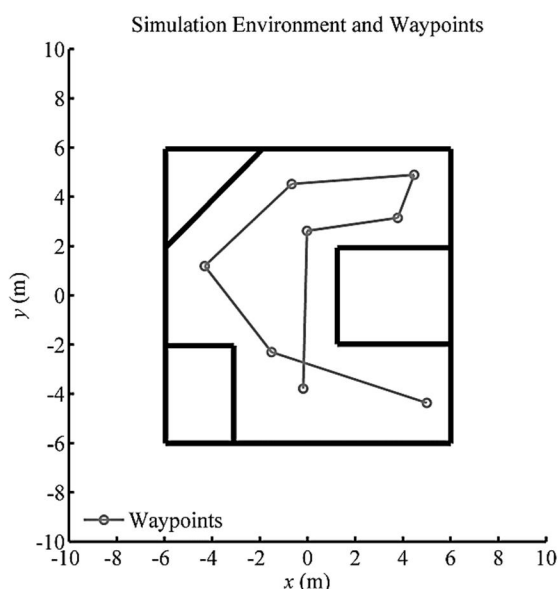


Fig. 1 Indoor environment and robot path simulated in MATLAB
شکل 1 محیط و مسیر هدایت ربات شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار متلب

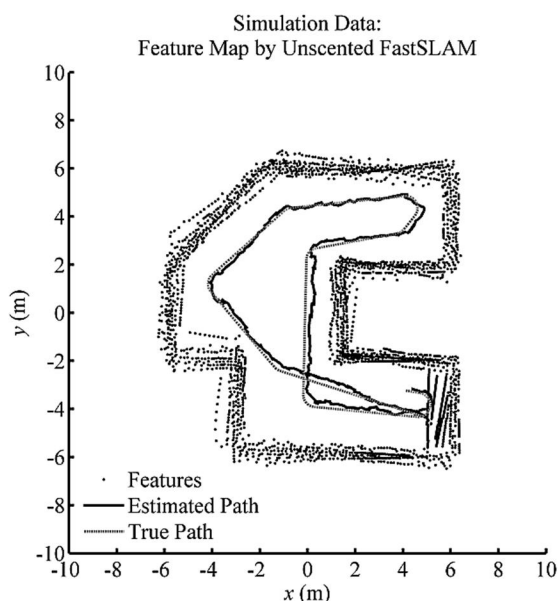


Fig. 2 Simulation Data: Feature map, true path and estimated path by Unscented FastSLAM

شکل 2 داده شبیه‌سازی: نقشه ویژگی‌مبنا، مسیر واقعی و مسیر تخمین‌زده شده توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه

$$\text{tri} = \text{delaunayn}(Z_{\text{map}}) \quad (19)$$

- 3- حذف نقاط تکراری از ویژگی‌های نقشه و حفظ نزدیک‌ترین نقطه
- 4- محاسبه احتمال ارتباط جفت نقطه و مقایسه با آستانه پذیرش و آستانه رد ویژگی
- 5- ذخیره نقطه‌ی پویا جدید به عنوان ویژگی جدید، ویژگی قدیمی و یا هیچ‌کدام

4- پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی

در این مقاله مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان از طریق اعمال الگوریتم‌های نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه و نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی روی داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی و نیز داده‌های لیزر واقعی انجام شده است. کد الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی در نرم‌افزار متلب توسط کیم نوشته شده [18] و به عنوان کد مبنا در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته و تغییرات لازم متناسب با شرایط مسئله روی آن اعمال شده است. برخی از مهم‌ترین این تغییرات عبارتند از:

- افزودن انطباق پویایی
- بهبود سرعت الگوریتم ارتباط داده‌ها
- تولید نقشه شبکه‌بندی محیط
- بهینه‌سازی مقدار متغیرهای الگوریتم از جمله آستانه پذیرش و رد ویژگی

خروجی‌های این الگوریتم‌ها عبارتند از: نقشه شبکه‌بندی محیط، نقشه ویژگی‌مبنا به همراه مسیر واقعی طی شده توسط ربات و مسیر تخمین‌زده شده توسط الگوریتم‌ها، و نیز میانگین خطای موقعیت و جهت‌گیری تخمین‌زده شده نسبت به موقعیت و جهت‌گیری واقعی ربات که در یک جدول بیان شده‌اند. همچنین برای بررسی تاثیر بهبود سرعت الگوریتم ارتباط داده‌ها و افزودن انطباق پویایی، زمان اجرای کل الگوریتم و زمان اجرای مراحل ارتباط داده‌ها و انطباق پویایی به صورت جدول ارائه شده است.

4-1-1- پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی روی داده لیزر به دست آمده از شبیه‌سازی

در این مرحله، محیط پیرامون ربات مطابق "شکل 1" شبیه‌سازی شده و نقاطی به عنوان راهنمای مسیر در آن تعبیه شده‌اند که ربات با دنبال کردن این نقاط در محیط حرکت می‌کند و اطلاعات سرعت هر لحظه برای استفاده در مدل حرکت ثبت می‌شود. خطای کنترل سرعت 0.1 متر بر ثانیه و خطای کنترل جهت ربات 1 درجه در ثانیه فرض شده‌اند. در این مرحله الگوریتم روی داده لیزر اعمال می‌شود که توسط حسگر پویسگر لیزری شبیه‌سازی شده به دست می‌آید. برد این حسگر 6 متر، میدان دید آن 180 درجه و رزولوشن زاویه‌ای آن برابر 1 درجه شبیه‌سازی شده است. همچنین نویز اندازه‌گیری آن به ترتیب 0.03 متر و 1 درجه در نظر گرفته شده‌اند. از نظر زمان‌بندی، ارسال فرمان کنترل سرعت به ربات و پویا محیط هم‌زمان با هم و هر 0.1 ثانیه صورت می‌گیرند. پس از ذخیره اطلاعات حرکت ربات و اطلاعات به دست آمده از حسگر شبیه‌سازی شده، در مرحله بعد این اطلاعات به صورت ورودی به الگوریتم داده شده و مورد پردازش برون خط قرار می‌گیرند.

4-1-1- عملکرد الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه

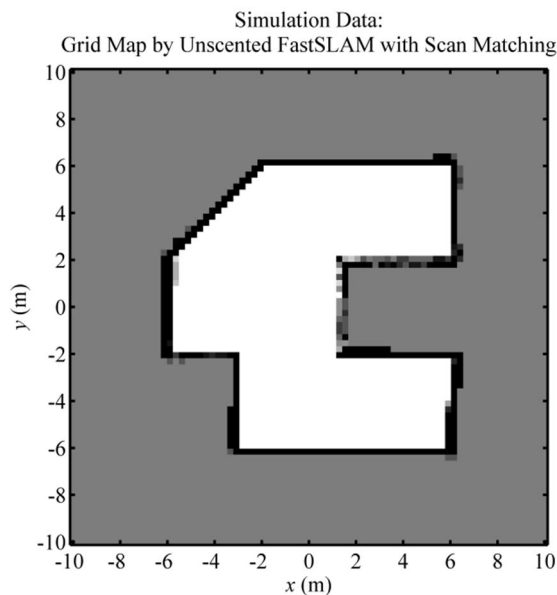


Fig. 5 Simulation Data: Grid map by Unscented FastSLAM with scan matching

شکل 5 داده شبیه‌سازی: نقشه شبکه‌بندی توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی

"شکل 6" خطای موقعیت و جهت‌گیری در طول مسیر را برای هر دو الگوریتم نشان می‌دهد. مقدار خطای تخمین توسط نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی در تمام گام‌ها کمتر از نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه است.

همچنین مقادیر میانگین خطای موقعیت و جهت‌گیری برای هر دو الگوریتم در جدول 1 آورده شده‌اند. متوسط خطای موقعیت 0.26 متر و متوسط خطای جهت‌گیری 0.046 رادیان است. مقایسه میانگین خطای این الگوریتم با روش قبل نشان می‌دهد که انطباق پویشی، تخمین موقعیت و

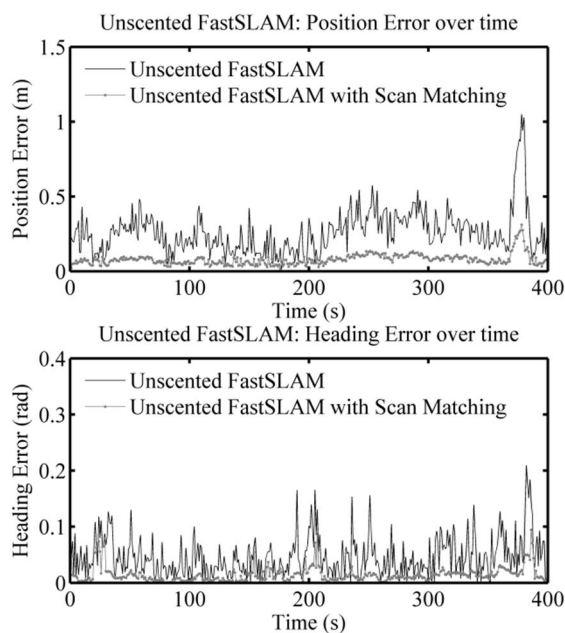


Fig. 6 Position and heading estimation error over time

شکل 6 خطای تخمین موقعیت و جهت‌گیری در طول زمان

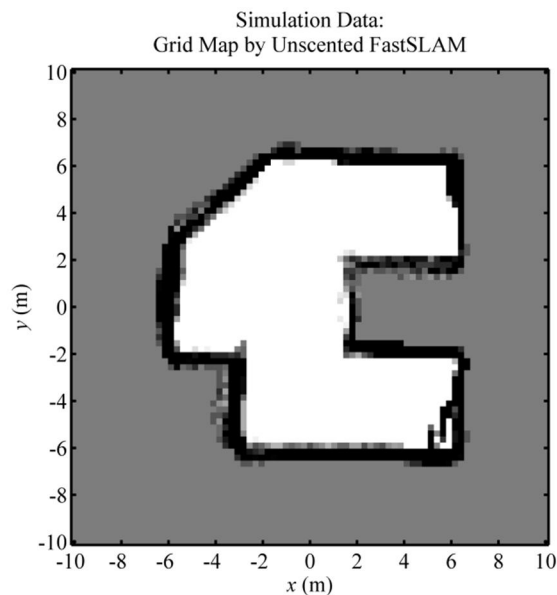


Fig. 3 Simulation Data: Grid map by Unscented FastSLAM

شکل 3 داده شبیه‌سازی: نقشه شبکه‌بندی توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه

4-1-2- عملکرد الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی
در این مرحله الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی روی داده لیزر حاصل از محیط شبیه‌سازی اعمال شد. نقشه‌های ویژگی‌منا و شبکه‌بندی به‌دست آمده به ترتیب در "شکل 4" و "شکل 5" آورده شده‌اند. همان‌طور که در "شکل‌های 4 و 5" مشخص است، دقت تخمین مسیر بیشتر شده و مسیر تخمین‌زده شده در الگوریتم دوم بسیار به مسیر واقعی نزدیک‌تر است. به‌همین دلیل نقشه‌های ویژگی‌منا و شبکه‌بندی دقیق‌تر با مرزهای باریک‌تر به‌دست آمده است.

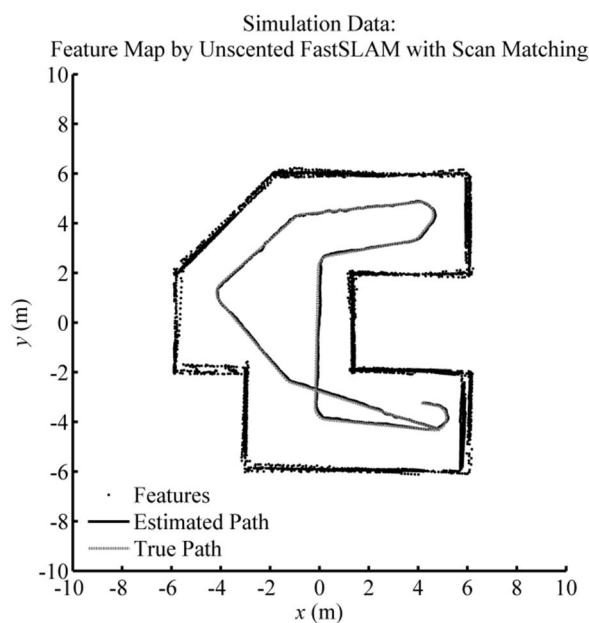


Fig. 4 Simulation Data: Feature map, true path and estimated path by Unscented FastSLAM with scan matching

شکل 4 داده شبیه‌سازی: نقشه ویژگی‌منا، مسیر واقعی و مسیر تخمین‌زده شده توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی

جدول 1 متوسط خطای تخمین موقعیت و جهت‌گیری در الگوریتم‌های نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه و نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی

Table 1 Average position and heading estimation

نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی بدون انطباق	نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی	متوسط خطای موقعیت
0.260	0.078	خطای موقعیت نرمالیزه
0.066	0.020	متوسط خطای جهت‌گیری
0.046	0.014	خطای جهت‌گیری نرمالیزه
0.029	0.009	

جهت‌گیری را به ترتیب 70% و 68% بهبود داده و در نتیجه نقشه دقیق‌تری ارائه می‌دهد، لازم به ذکر است خطای نرمالیزه از تقسیم مقدار خطا بر مقدار میانگین به‌دست می‌آید.

در جدول 2 زمان اجرای الگوریتم‌های نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی برای داده شبیه‌سازی آورده شده است. زمان اجرای الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه برای 100 پویا 236 ثانیه است که 219 ثانیه (93%) از آن مربوط به مرحله ارتباط داده‌ها است. همین درصد قابل توجه انگیزه‌بخش تلاش برای بهبود سرعت ارتباط داده‌ها در این مقاله بوده است. مدت زمان ارتباط داده‌ها در الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه شده در این مقاله تنها 4 ثانیه است که 54 بار سریع‌تر است. در نتیجه با وجود اضافه کردن انطباق پویایی، نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی ارائه شده در این مقاله، 3 بار سریع‌تر از نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه است.

2-4- پیاده‌سازی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی روی داده لیزر به‌دست آمده از آزمایش عملی

برای بررسی عملکرد الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی در شرایط واقعی، آزمایش عملی نیز انجام شد. در این آزمایش ربات مجهز به پوششگر لیزری و انکودر در یک محیط بسته به‌صورت دستی حرکت داده شد و مجموعه اطلاعات شامل دور چرخ‌های چپ و راست به‌دست آمده از حسگر انکودر و داده لیزر به‌دست آمده از پوششگر لیزری در محیط دانشگاه صنعتی اصفهان و به کمک رباتی که در همین دانشگاه ساخته شده به‌دست آمده است.

پوششگر لیزری مورد استفاده در این آزمایش دارای برد 6 متر، میدان دید 180 درجه و رزولوشن 0.3 درجه است. نویز اندازه‌گیری این مدل پوششگر 0.03 متر و 1 درجه است. مدت انجام آزمایش 120 ثانیه بوده و به‌طور تقریبی در هر ثانیه 10 پویا لیزر و 29 دور چرخ چپ و راست ضبط شده است. از تعداد دور چرخ چپ و راست برای محاسبه مقدار و جهت سرعت ربات استفاده می‌شود. ربات به صورت دستی حرکت داده شده و هماهنگی خاصی

جدول 2 داده شبیه‌سازی: زمان اجرای الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی برای صد پویا

Table 2 Simulation data: Execution time of Unscented FastSLAM for 100 scans

نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی بدون انطباق پویایی	نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی	زمان کل الگوریتم [ثانیه]
236	75	زمان تطابق پویایی [ثانیه]
0	58	زمان ارتباط داده [ثانیه]
219	4	

بین زمان داده کنترل حرکت و داده لیزر وجود ندارد. بنابراین در هر گام، با مقایسه زمان متناظر با آن موضع و زمان متناظر با پویای لیزر، نزدیک‌ترین پویا از نظر زمانی انتخاب و پردازش می‌شود. به دلیل آن‌که بازه‌های زمانی بسیار کوچک هستند، اختلاف بین زمان حرکت و زمان پویا در حدود 0.1 ثانیه و قابل چشم‌پوشی است.

در این مرحله نتایج نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی با نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه از نظر دقت نقشه و زمان اجرا مقایسه می‌شود. متغیرهای الگوریتم متناسب با شرایط آزمایش تنظیم شده‌اند.

4-2-1- پیاده‌سازی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه روی داده لیزر به‌دست آمده از آزمایش عملی

مشابه قسمت قبل، ابتدا عملکرد نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه روی داده لیزر واقعی بررسی می‌شود. نقشه‌های ویژگی‌منا و شبکه‌بندی به‌دست آمده به ترتیب در "شکل 7" و "شکل 8" نشان داده شده‌اند. به دلیل آنکه مسیر واقعی ربات در اختیار نبوده، امکان مقایسه مسیر تخمین زده شده با مسیر واقعی وجود ندارد؛ بنابراین ارزیابی عملکرد الگوریتم از طریق کیفیت نقشه صورت می‌گیرد.

همان‌طور که در "شکل‌های 7 و 8" مشخص است، مرزها و موانع در حد قابل قبولی در نقشه‌های ویژگی‌منا و شبکه‌بندی نشان داده شده‌اند. اما به دلیل خطا در تخمین مسیر، مرزها چندان باریک نیستند و حتی گوشه بالای اتاق دوبار تکرار شده است. بیرون‌زدگی‌های موجود در نقشه، در اثر درهای باز ایجاد شده‌اند ولی چندان واضح نشان داده نشده‌اند.

4-2-2- پیاده‌سازی الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی روی داده لیزر به‌دست آمده از آزمایش عملی

پس از اجرای الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویایی، نقشه‌های ویژگی‌منا و شبکه‌بندی به‌دست آمدند که در "شکل 9" و "شکل 10" نشان داده شده‌اند. مقایسه این نقشه‌ها با نتایج قسمت قبل نشان

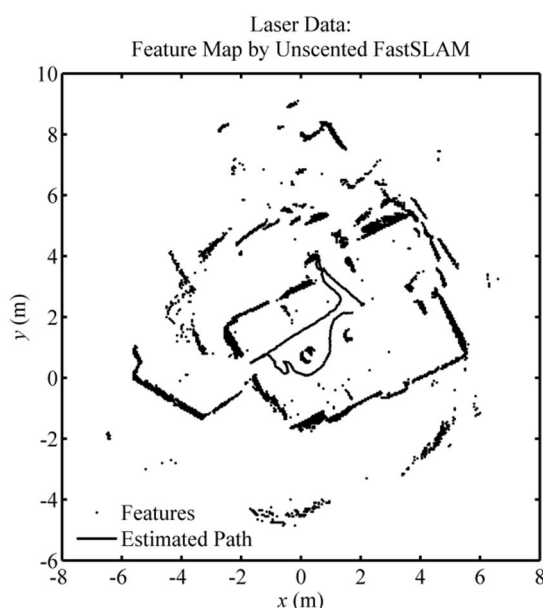


Fig. 7 Experimental Data: Feature map and estimated path by Unscented FastSLAM

شکل 7 داده آزمایشگاهی: نقشه ویژگی‌منا و مسیر تخمین‌زده شده توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه

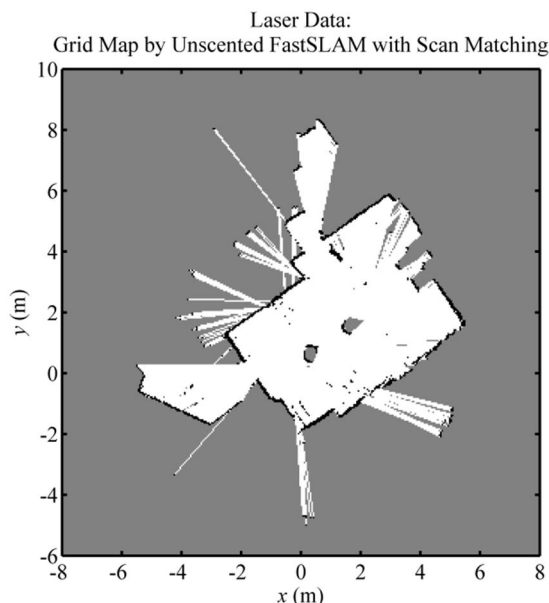


Fig. 10 Experimental Data: Grid map by Unscented FastSLAM with scan matching

شکل 10 داده آزمایشگاهی: نقشه شبکه‌بندی توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی

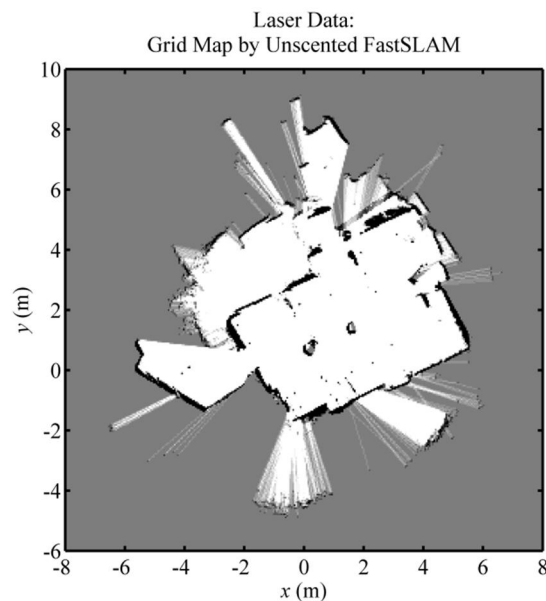


Fig. 8 Experimental Data: Grid map by Unscented FastSLAM

شکل 8 داده آزمایشگاهی: نقشه شبکه‌بندی توسط الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه

جدول 3 داده آزمایشگاهی: زمان اجرای الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی برای صد پویش

Table 3 Experimental data: Execution time of Unscented FastSLAM for 100 scans

نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی	نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی بدون انطباق پویشی	
93	385	زمان کل الگوریتم [ثانیه]
68	0	زمان تطابق پویشی [ثانیه]
6	343	زمان ارتباط داده [ثانیه]

نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی ارائه شده در این مقاله تنها 6 ثانیه و 57 بار سریع‌تر است. بنابراین با وجود اضافه کردن انطباق پویشی، نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی ارائه شده در این مقاله، 4 بار سریع‌تر از نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه است.

5- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله برای اولین بار از ترکیب الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی استفاده شد و سرعت مرحله ارتباط داده به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. سپس نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی با انطباق پویشی روی داده لیزر به‌دست آمده از شبیه‌سازی و داده لیزر واقعی پیاده‌سازی شد و نتایج آن با نتایج نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان داد که با افزودن یک مرحله انطباق پویشی به الگوریتم، دقت تخمین مسیر و نقشه به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. مقدار کاهش خطای تخمین موضع در شبیه‌سازی 68% است و در آزمایش عملی به دلیل در دست نداشتن مسیر واقعی قابل اندازه‌گیری نیست. همچنین مشکل زمان‌بر بودن مرحله ارتباط داده‌ها، با طراحی بهتر حلقه و استفاده از دستورهای مناسب‌تر برطرف شد. ارتباط داده‌ها در حدود 50 بار سریع‌تر از قبل شده و زمان کل الگوریتم جدید در شبیه‌سازی 68% و در

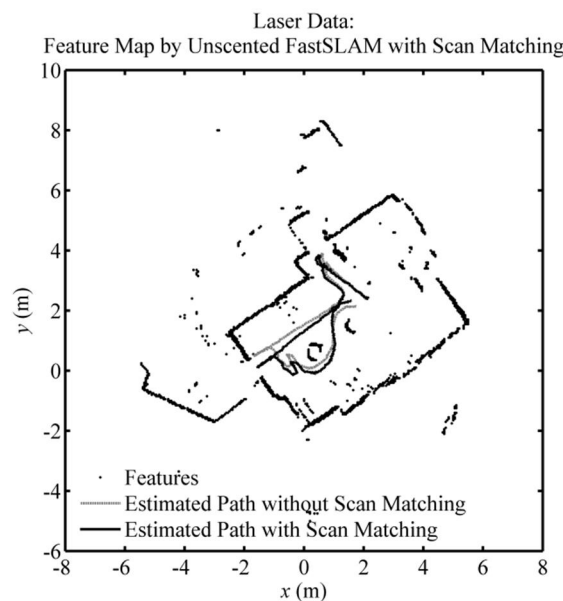


Fig. 9 Experimental Data: Feature map and estimated path by both Unscented FastSLAM algorithms

شکل 9 داده آزمایشگاهی: نقشه ویژگی‌مبنا، مسیر تخمین زده شده توسط هر دو الگوریتم نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی

می‌دهد که انطباق پویشی باعث شده مرزها با دقت بیشتر و باریک‌تر از قبل ترسیم شوند. موانع نیز کامل‌تر از قبل در نقشه ظاهر شده‌اند. در "شکل 9" علاوه بر نقشه ویژگی مبنا و مسیر تخمین‌زده شده توسط هر دو الگوریتم نشان داده شده است.

همچنین در جدول 3 زمان پیاده‌سازی الگوریتم‌های نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی روی داده لیزر واقعی و برای 100 پویش آورده شده است. در نقشه‌برداری سریع بدون ردیابی اولیه، 89% از زمان کل الگوریتم مربوط به مرحله ارتباط داده‌ها است، در حالی که این مدت زمان در الگوریتم

آزمایش واقعی 75% کمتر از الگوریتم اولیه است.

6- تقدیر و تشکر

در این‌جا لازم است از آزمایشگاه رباتیک و مکترونیک پیشرفته دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان و جناب آقای مهندس مرتضی بدلی به سبب همکاری بی‌دریغ در تهیه امکانات و محیط مورد نیاز تقدیر و تشکر شود.

7- مراجع

- [1] R. Chatila, J. P. Laumond, Position referencing and consistent world modeling for mobile robots, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Silver Spring, USA: IEEE, pp. 138-145, 1985.
- [2] C. G. Harris, J. Pike, 3D positional integration from image sequences, *Image and Vision Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 87-90, 1988.
- [3] R. Smith, M. Self, P. Cheeseman, *Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics*, pp. 167-193, New York: Springer, 1990.
- [4] A. Doucet, N. De Freitas, K. Murphy, S. Russell, Rao-Blackwellised particle filtering for dynamic Bayesian networks, *Proceeding of the Sixteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, pp. 176-183, 2000.
- [5] R. Martinez-Cantin, J. Castellanos, Unscented SLAM for large-scale outdoor environments, *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Canada: IEEE, pp. 3427-3432, 2005.
- [6] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit, FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem, *Proceeding of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, Edmonton, Canada: AAAI, pp. 593-598, 2002.
- [7] C. Kim, R. Sakthivel, W. K. Chung, Unscented FastSLAM: a robust and efficient solution to the SLAM problem, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 4, pp. 808-820, 2008.
- [8] Z. Kurt-Yavuz, S. Yavuz, A comparison of EKF, UKF, FastSLAM2. 0, and UKF-based FastSLAM algorithms, *Proceeding of 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Lisbon, Portugal: IEEE, pp. 37-43, 2012.
- [9] D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, S. Thrun, An efficient FastSLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements, *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA: IEEE, pp. 206-211, 2003.
- [10] G. Michalíček, D. Klimentjewa, J. Zhang, A 3D simultaneous localization and mapping exploration system, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Phuket, Thailand: IEEE, pp. 1059-1065, 2011.
- [11] J. Röwekämper, C. Sprunk, G. D. Tipaldi, C. Stachniss, P. Pfaff, W. Burgard, On the position accuracy of mobile robot localization based on particle filters combined with scan matching, *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Algarve, Portugal: IEEE, pp. 3158-3164, 2012.
- [12] T. Furukawa, L. Dantanarayana, J. Ziegler, R. Ranasinghe, G. Dissanayake, Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation, *Proceeding of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, San Diego, USA: IEEE, pp. 37-42, 2015.
- [13] Z. Zheng, Y. Li, LIDAR data registration for unmanned ground vehicle based on improved ICP algorithm, *Proceeding of 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China: IEEE, pp. 554-558, 2015.
- [14] P. J. Besl, N. D. McKay, Method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
- [15] A. S. Mian, M. Bennamoun, R. Owens, Three-dimensional model-based object recognition and segmentation in cluttered scenes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28, No. 10, pp. 1584-1601, 2006.
- [16] A. S. Mian, *icp2*, Accessed on 16 December 2015; <http://staffhome.ecm.uwa.edu.au/~00053650/code/icp2.m>.
- [17] T. Bailey, *SLAM Package of Tim Bailey*, Accessed on 16 December 2015; <https://openslam.org/bailey-slam.html>.
- [18] C. Kim, *Unscented FastSLAM*, Accessed on 16 December 2015; <https://openslam.org/ufastslam.html>.