

Estimation of Magnetic Field Maps With Mobile Platforms

Erstellung von Magnetfeldkarten mit mobilen Plattformen

Stefan Hensel*, Marin B. Marinov‡

* University of Applied Sciences Offenburg, Department for Electrical Engineering, Badstraße 24, D-77652 Offenburg, Germany, stefan.hensel@hs-offenburg.de

‡ Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Electronics, 8, Kliment Ohridski Blvd., BG-1756 Sofia, Bulgaria, mbm@tu-sofia.bg

Abstract — The aim of this project is to study the extent to which local magnetic fields can be used for the exact localization in indoor environments, for example in railway stations, airports or shopping centers. For this purpose, we investigate whether and how low-cost magnetic field sensors and mobile robot platforms can be used to create maps that improve the accuracy and robustness of later navigation with smartphones or other devices.

Zusammenfassung — Für die genaue Positionsbestimmung in Innenräumen, beispielsweise in Bahnhöfen oder Einkaufszentren, soll in dem beschriebenen Projekt untersucht werden, inwiefern lokale Magnetfelder genutzt werden können, um Genauigkeit und Robustheit zu erhöhen. Hierzu wird untersucht, ob und wie kostengünstige Magnetfeldsensoren und mobile Roboterplattformen genutzt werden können, um Karten zu erstellen, die eine spätere Navigation, beispielsweise mit Smartphones oder mit anderen mobilen Geräten.

I. EINFÜHRUNG

Während die Positionsbestimmung unter freiem Himmel seit längerer Zeit auf etablierte Weise durch eine Kombination von Satellitennavigation und Inertialsensorik erfolgt, ist die präzise Ortsbestimmung innerhalb von Gebäuden weiterhin der Gegenstand aktiver Forschung. Im Labor für Mess- und Sensortechnik erfolgt die Untersuchung von kostengünstigen Sensoren zur Verringerung oder Vermeidung der unweigerlich auftretenden Drift der inertialen Navigation.

Das natürlich auftretende Erdmagnetfeld wird in Gebäuden durch die verwendeten Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen teils massiv verzerrt. Diese Störungen der magnetischen Flussdichte \vec{B} sind lokal stark ausgeprägt und weitestgehend stationär. Sie können daher als Merkmal für die Positionsbestimmung verwendet werden [1]. Vorab kalibrierte Magnetfeldsensoren messen diese Merkmale und verwenden sie als Orientierungshilfe in der Navigation [2].

Die von den Sensoren gewonnene Information wird dem Nutzer sinnvoller Weise in Form einer Karte zur Verfügung gestellt. Das beschriebene Projekt untersucht, wie diese Karten mit Hilfe mobiler Roboter erstellt werden können. Besonderes Augenmerk wird auf das Zusammenführen mehrerer individuell erstellter Karten gelegt, so dass entweder ein Schwarm von Robotern eingesetzt werden kann oder ein einzelner Roboter die Karten in mehreren Durchläufen erstellen kann.

II. METHODIK

Für die gegebene Problemstellung wurde die Kartenerstellung in zwei parallele Stränge aufgeteilt. Die Positionsbestimmung des Roboters erfolgt durch die Fusion von Inertialsensoren, d.h. Beschleunigungs- und Drehratensensoren, mit Odometriedaten und den Entfernungsdaten aus einer Tiefenkamera. Der eingesetzte Algorithmus ist ein Partikelfilter, der eine simultane Lokalisierung und Kartierung (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) ermöglicht und als Ausgangsdaten die Position sowie eine zweidimensionale

Rasterkarte der Umgebung liefert. Aufbauend auf dieser Position wird mit Messdaten eines handelsüblichen Magnetfeldsensors die Magnetfeldkarte berechnet.

Die Erstellung der Karte muss die Unsicherheit der Position aufgrund von Umgebungseinflüssen und verrauschten Sensoren ebenso berücksichtigen wie die unsicherheitsbehafteten und störanfälligen Messungen des Magnetfeldsensors. Da die Messungen des Sensors punktuell auf der gefahrenen Trajektorie des Roboters erfolgen, muss eine Interpolation und Extrapolation zwischen den Punkten und über diese hinaus durchgeführt werden. Die Aufgabe der Kartierung mit geringer Datenmenge ist in Abb. 1 exemplarisch für den vorliegenden zweidimensionalen Fall dargestellt.

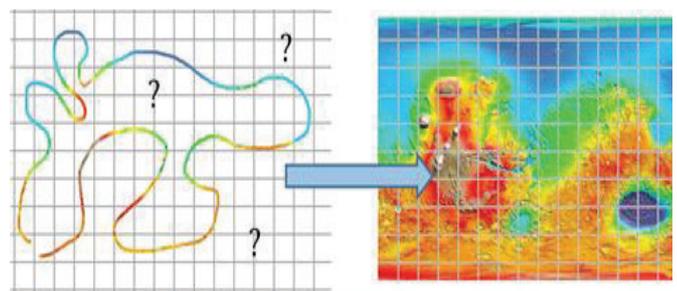


Abb. 1. Prädiktion der magnetischen Flussdichte \vec{B} in unbekanntem Bereich auf Basis verteilter Messungen

Für die Vorhersage dieser Werte und die Verarbeitung der zugehörigen Unsicherheit in Form einer Kovarianz wurde in der Arbeit der Einsatz von sog. Gaußprozessen untersucht.

A. Gaußprozess-Regression und Interpolation

Gaußprozesse [3] sind eine Verallgemeinerung der multivariaten Gaußverteilung und können genutzt werden, um eine stetige und glatte Funktion aus Messdaten zu schätzen. Ein Spezialfall der Gaußprozess-Regression (GPR), der auch in der vorliegenden Arbeit Verwendung findet, ist in der Geostatistik

unter dem Namen Kriging bekannt. Daneben können Gaußprozesse auf eine Vielzahl Probleme des maschinellen Lernens angewandt werden und finden Einsatz in der Glättung mit Splines, Klassifikationsproblemen oder der Datenvorhersage. Ein veranschaulichendes Beispiel für die Regression auf Basis weniger Messungen ist in Abb. 2 für den Fall von einer, zwei und drei Messungen dargestellt.

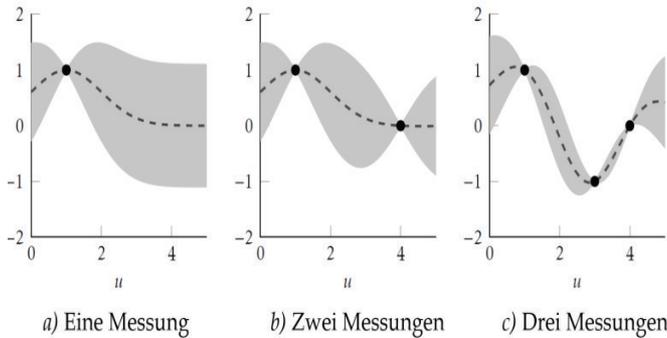


Abb. 2. Prinzip der Gaußprozess Regression.

Messpunkte sind schwarz dargestellt, der grau mattierte Bereich gibt das sog. 95% Konfidenzintervall (die zweifache Standardunsicherheit der geschätzten Funktion) auf Basis der gegebenen Messwerte wieder.

In der hier verwendeten GPR werden die Modellfunktionen $f(\mathbf{x})$ als Realisierungen eines stochastischen Prozesses gesehen, dessen Kovarianzfunktion $\kappa(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ a priori vorgegeben wird. Die Bestimmung der Funktion erfolgt auf Basis von n gegebenen und unsicheren Messungen y_1, y_2, \dots, y_n , die an den Stellen $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ beobachtet werden. Man erhält dann das Modell

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &\sim GP(0, \kappa(\mathbf{x}, \mathbf{x}')), \\ y_i &= f(x_i) + \varepsilon_i, \end{aligned} \quad (1)$$

bei dem angenommen wird, dass der Fehler ε einem weißen Rauschen entspricht. Damit sind das Mess- und a priori Modell normalverteilt und das geschätzte a posteriori Modell wird wiederum normalverteilt sein.

B. Wahl der Kovarianzfunktion

Die Wahl einer spezifischen Kovarianzfunktion drückt das Domänenwissen über den unterliegenden Prozess aus, im vorliegenden Fall über das Verhalten des Magnetfeldes in geschlossenen Räumen. Aufgabe der Inferenz ist es, aus den Messdaten die Parameter dieser Kovarianzfunktion zu schätzen. Die Parameter werden hierbei als sogenannte Hyperparameter bezeichnet, der Typ der Kovarianzfunktion wird in Form von Modellwissen a priori festgelegt. Eine der meistgewählten Kovarianzfunktionen ist eine stationäre Exponentialverteilung (auch radiale Basisfunktion RBF) der Form

$$\kappa_{RBF}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_{RBF}^2 \cdot \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2}{2l_{RBF}^2}\right) \quad (2)$$

mit den Hyperparametern σ_{RBF}^2 und l_{RBF} , die die Skale und Granularität (Bandbreite) der Funktion ausdrücken.

Ein Beispiel für den Einfluss des Hyperparameters l_{RBF} auf die geschätzte Funktion mit Konfidenzintervall ist in Abb. 3 gezeigt.

Die Schätzung der Hyperparameter auf Datenbasis erfolgt im optimalen Sinne durch Bestimmung der Maximum a posteriori Wahrscheinlichkeit.

Die Verwendung von Gaußprozessen ermöglicht nicht nur die Einbindung aller in der Kartierung auftretenden

Unsicherheiten, sondern erlaubt die anschließende Fusionierung der erstellten Karten auf Basis der geschätzten Genauigkeit. Dies ist möglich, indem die Karte jeweils mit allen Messungen neu berechnet wird oder indem mehrere interpolierte Karten durch eine gewichtetes arithmetisches Mittel auf Basis der Kovarianz zusammengeführt werden, die zu beliebigen Zeiten und mit beliebigen Sensoren aufgezeichnet wurden.

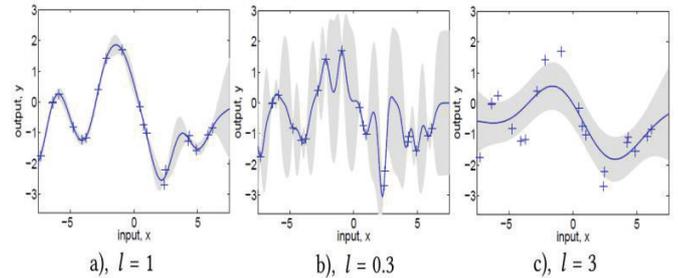


Abb. 3. Einfluss des Hyperparameters l auf die Schätzung der Funktion [3].

III. VERSUCHSAUFBAU

A. Hardware

Turtelbot

Für die Erprobung wurde ein mobiles Robotersystem vom Typ Turtlebot verwendet. Als Middleware kam das Robot Operating System (ROS) [4] zum Einsatz, das eine einfache Treiberanbindung erlaubt. Das ROS ist eine open source Softwareumgebung, welche Entwicklern verschiedene Bibliotheken und Werkzeuge zur Verfügung stellt, um die Entwicklung von Anwendungen in der Robotik zu erleichtern. So werden zahlreiche Hardwareelemente von Herstellern vertrieben, wofür es Gerätetreiber unter ROS gibt.

Ein Turtlebot ist eine kleine Roboterplattform im Niedrigpreissegment. Der Roboter wird, wegen seine Flexibilität und seinem einfachen Zugang, überwiegend für Realisierbarkeitsstudien und in der Forschung oft eingesetzt. Er besteht aus einer flachen mobilen Trägerplattform, dem Kobuki von Yujin Robot, einer Kinect von Microsoft sowie einem Aufbau um Platz für Laptops, weitere Sensoren oder sonstige Aufbauten zu bieten.

Inertiale Messeinheit – Razer IMU 9 Degree of Freedom

Die Lokalisierung des Systems wurde mit dem *gmapping* SLAM-Algorithmus [5] realisiert. Für die Aufzeichnung des Magnetfeldes wird ein Dreiachs-MEMS-Magnetfeldsensor genutzt, wie er beispielsweise in Smartphones zu finden ist. Hier wurde ein HMC5883L drei-Achsen Magnetfeldsensor verwendet. Zusätzlich ist eine vollständige inertielle Messeinheit (IMU), bestehend aus einem Dreiachs-Drehratensensor und Dreiachs-Beschleunigungssensor, in dem Chip integriert. Die IMU erlaubt über die Berechnung der Lage die Projektion der dreidimensionalen Magnetfeldmessung in ein globales Koordinatensystem und damit die Bestimmung der Flussdichtekomponenten $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)^T$.

Ein weiterer Vorteil der IMU ist, dass, je nach Anwendung, ein Teil der Daten- und Signalverarbeitung bereits von der IMU auf einen ATmega328 Mikrocontroller übernommen werden kann. Die Auflösung des Magnetfeldsensors beträgt $0,5 \mu T$ bei einem Messbereich von $\pm 800 \mu T$ und eine Abweichung von $0,2 \mu T$.

Abb. 4 zeigt den verwendeten Roboter sowie den Versuchsaufbau mit Rechner und Magnetfeld-IMU-Sensor.



Abb. 4. Mobile Roboterplattform (links) und Versuchsaufbau mit Magnetfeldsensor-IMU-Kombination (rechts).

B. Software

Für die Schätzung der Parameter des Gaußprozesses werden komplexe Optimierungsverfahren benötigt, die in der Regel die Komplexität $O(n^3)$ aufweisen. Da für die Interpolation des Magnetfeldes hunderte bis tausende Messwerte vorliegen, wurde daher auf approximative Verfahren zurückgegriffen. Als a priori Annahme der Messfunktion wurde ein Gauß'sches Rauschen angenommen, die Kovarianz wurde a priori zu einer Matérn-Funktion festgesetzt, die eine generalisierte Version der RBF darstellt und einen zusätzlichen Hyperparameter zur Festlegung der Glattheit enthält [6]. Die Berechnung erfolgte offline im Batch-Verfahren, d.h. für den gesamten Datensatz nach der Aufzeichnung der Messwerte. Eingangsdaten sind die Magnetometermessungen \vec{B} zusammen mit der Position, Orientierung und der Kovarianzmatrix, die durch den SLAM-Algorithmus bestimmt wurden.

Datenvorverarbeitung

Die magnetische Flussdichte wurde in x , y und z gemessen $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)^T$. Um das Signal vorerst von Messrauschen und einzelnen Ausreißern zu bereinigen, wurde es mit einem Medianfilter 5. Ordnung geglättet. Da sich das Magnetfeld jedoch durch die begrenzte Geschwindigkeit des Turtlebots nicht besonders schnell ändern kann, wurden anschließend die Messungen mit einem Glättungsfilter geglättet. Die Größe des Kernels variiert hierzu zwischen den einzelnen Messungen und muss gelegentlich angepasst werden. Für einen Großteil der Messungen im Labor wurde ein Kernel der Ordnung $n \approx 100$ gewählt, da hier ein sehr unregelmäßiges Magnetfeld vorliegt. In Bereichen, in denen größtenteils ein gleichmäßiges Magnetfeld vorhanden ist und es nur einzelne Regionen gibt in denen das Magnetfeld stark schwankt, muss der Filterkernel verkleinert werden um Messungen nicht vollständig zu entfernen. Im Foyer der Hochschule Offenburg wurde hierfür ein Kernel der Größe $n \approx 20$ gewählt.

Da die IMU und die Odometrie des Turtlebots mit unterschiedlichen Abtastfrequenzen abgerufen werden, mussten diese, obwohl sie bereits durch ROS einen gemeinsamen Zeitstempel haben, einander noch zugewiesen werden [7].

Kartierung

Um nun aus der gefahrenen Bahn eine flächige Magnetfeldkarte zu erstellen, existieren einige Interpolationsverfahren. Matlab selbst bietet mit der Funktion

griddata die Möglichkeit, Funktionen $f(x, y)$ über ein zuvor definiertes Gitter zu interpolieren. Die hier verwendete Methode basiert auf Delaunay-Triangulation. Hierbei werden Dreiecke zwischen Punktepaare im Raum gebildet. Diese Dreiecke sind so gewählt, dass lange, dünne Dreiecke vermieden werden. Da die Dreiecke das gesamte Gitter abdecken und sich nicht überlappen, kann jedem Punkt auf dem Gitter nun ein Wert zugewiesen werden [8].

Kartenfusionierung

Um nun aus mehreren Messreihen eine Karte zu erzeugen, ist eine Fusion der Messwerte nötig. Diese können entweder durch das mehrfache Abfahren einer Umgebung mit einem einzelnen Roboter oder durch paralleles Abfahren einer Umgebung mit mehreren Robotern erzeugt werden. Für eine Interpolation mit Gaußprozessen gestaltet sich diese Fusionierung einfach. Es können dem Gaußprozess alle Messwerte mit einer zugeordneten Unsicherheit als Trainingsdaten zugefügt werden. Die daraus resultierende Interpolation ist bereits gewichtet und liegt einer Verteilungsfunktion zugrunde. Es macht hierbei keinen Unterschied, ob dieselbe Stelle mehrmals bei einer Messung durchfahren wird, oder ob mehrere Messungen fusioniert werden. Beides hat zur Folge, dass die entstehende Karte Messungengenauigkeiten oder Messfehler weniger stark gewichtet.

Bei der gewöhnlichen Interpolation würde ein solches Vorgehen allerdings nicht zum Richtigen Ergebnis führen, da jeder Wert mit der gleichen Gewichtung in das Ergebnis eingeht.

Um nun mehrere Karten gemäß ihrer Unsicherheit zu fusionieren, wird jedem Punkt \vec{P} neben einem Wert z_{mag} der die magnetische Feldstärke an der Position x und y ausdrückt, ein Wert σ_{max} zugewiesen:

$$\vec{P}_{map} = \vec{P}_{map}(x, y, z_{mag}, \sigma). \quad (3)$$

Sind Messungen vorhanden, die die gesamte Fläche im Raum dicht abdecken, lässt sich die Kartenfusionierung mittels eines gewichteten Mittelwertes durchführen. Die Vorteile dieser Methode gegenüber den Gaußprozessen liegen hierbei in der geringeren Rechenlast. Ein grundlegendes Problem stellt allerdings die Gewinnung der Messdaten in ausreichender Dichte dar, so dass auf eine intelligente Inter- und Extrapolation der Messwerte nicht verzichtet werden kann [9].

IV. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

In einer ersten Untersuchung wurde die Eignung der Gaußprozesse für die Interpolation der Messdaten betrachtet. Zum Vergleich wurde eine klassische zweidimensionale lineare Interpolation herangezogen. Obgleich letztere nicht die Möglichkeit der Kovarianzangabe und -schätzung bietet, ist die Berechnungszeit um mehrere Größenordnungen geringer.

Allerdings wird schnell deutlich, welcher qualitativer Vorteil durch die Interpolation und Prädiktion mit Gaußprozessen erreicht werden kann. Abb. 5 zeigt die lineare Interpolation auf der linken Seite auf Basis der befahrenen Trajektorie, die in schwarz dargestellt ist. Das Resultat des GP für den gleichen Datensatz ist auf der rechten Seite dargestellt.

Für die Arbeit wurden Magnetfeldkarten auf Basis mehrerer Messfahrten in verschiedenen Bereichen der Hochschule aufgezeichnet. Abb. 6 zeigt exemplarisch die qualitativen Ergebnisse für einen kleinen Bereich des Labors für Mess- und Sensortechnik an der Hochschule Offenburg.

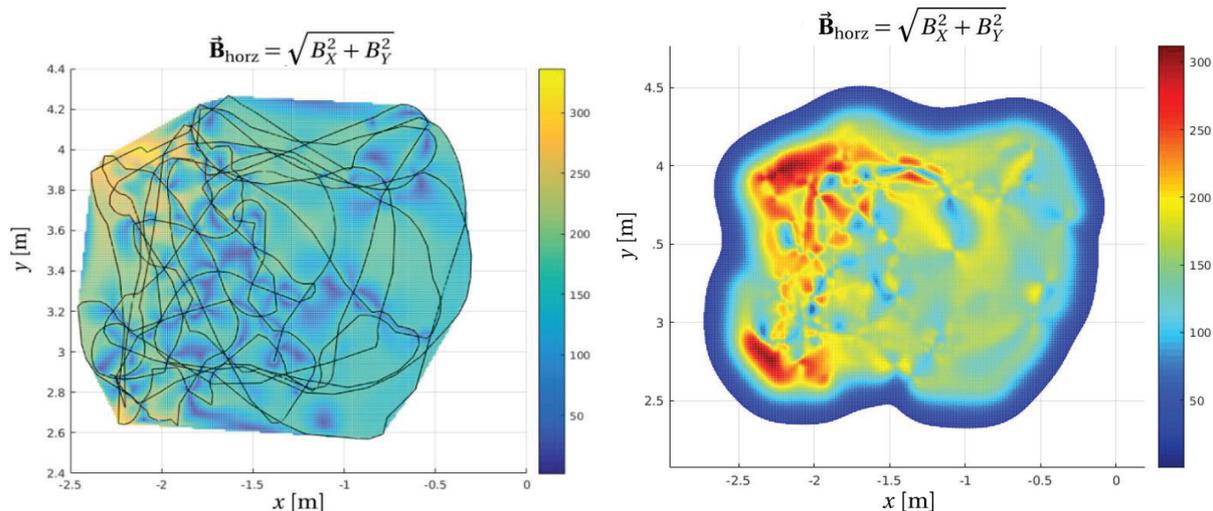


Abb. 5. Erstellte Karte der horizontalen Flussdichte.

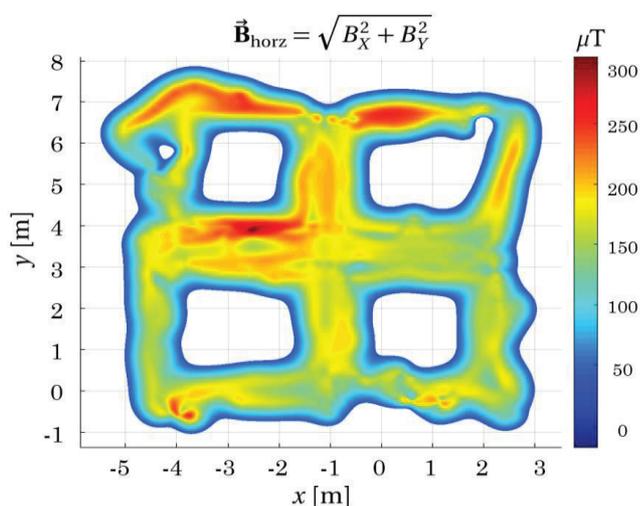


Abb. 6. Exemplarische Karte der horizontalen Flussdichte des Labors für Mess- und Sensortechnik.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung zeigt, dass die Gaußprozess-Regression grundlegend geeignet ist, um aus einzelnen Messungen eine vollständige und nutzbare Karte kontinuierlicher Merkmale zu erzeugen. Die erstellten Karten weisen einen guten Detaillierungsgrad auf und zeigen beispielsweise Schaltschränke oder Heizkörper. Die Vorteile gegenüber weniger aufwendigen Verfahren liegen in der einfachen Einbindung neuer Messungen, der Verfügbarkeit eines Qualitätsmaßes in Form einer Kovarianzmatrix und darauf basierend der natürlichen Integration in stochastische Lokalisierungsverfahren. Die Modellierung erlaubt zudem das Einbringen von Randbedingungen und Modellwissen. Dies alles geht allerdings zu Lasten einer schnellen Berechnung.

Die Karten wurden mit einer Auflösung von 5cm erstellt, das Potenzial für eine Positioniergenauigkeit liegt im Rahmen einiger Dezimeter bis Meter, was für die kontinuierliche Verbesserung und Driftkorrektur inertialer Sensoren bereits ausreicht.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Li, T. Gallagher, A. Dempster and C. Rizos, "How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning?," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sydney, Australia, 2012.
- [2] M. Frassl, M. Angermann, M. Lichtenstern, P. Robertson, B. Julian und M. Donic, "Magnetic maps of indoor environments for precise localization of legged and nonlegged locomotion", in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 2013.
- [3] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams., *Gaussian processes for machine learning*, Cambridge, MA, USA: MIT press, 2006.
- [4] M. Quigley, B. Gerkey and W. Smart, *Programming Robots with ROS*, Sebastopol, CA, USA, : O'Reilly Media, 2015.
- [5] G. Grisetti, C. Stachniss and Wolfram Burgard, "Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, pp. 34-46, 2007.
- [6] B. Minasny and B. McBratley, "Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function," *Geoderma*, vol. 140, pp. 323-456, 2007.
- [7] Z. Kokolanski, "Hardware techniques for improving the calibration performance of direct resistive sensor-to-microcontroller interface," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 20, no. 1, p. 529-542, 2013.
- [8] I. Rachev, "MATLAB Toolbox for Quality Assessment Processing in Optical Systems," *Journal of the TU Sofia, branch Plovdiv "Fundamental Sciences and Applications"*, vol. 14, pp. 545-550, 2009.
- [9] T. Tashev, V. Monov, R. Tasheva, "High Performance Computations for Study the Stability of a Numerical Procedure for Crossbar Switch Node," in *Lecture Notes in Computer Science, International Conference on Numerical Analysis and Its Applications*, Springer, Cham, Vol. 10187, pp. 665-673, 2017.