

Range Only Simultaneous Localization and Mapping with Ultra-Wideband

Bachelorarbeit

Fachhochschule Aachen
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Ingenieur-Informatik

Albert Kasdorf
geb. am 29.12.1984 in Pawlodar
Matr.-Nr.: 3029294

Gutachter:
Prof. Dr. rer. nat. Alexander Ferrein
Prof. Dipl.-Inf. Ingrid Scholl
Prof. Dr.-Ing. Thorsten Ringbeck

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Aachen, 13. Dezember 2017

Ort, Datum

Albert Kasdorf

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | ix |
| Tabellenverzeichnis | xi |
| 1. Einführung | 1 |
| 1.1. Aufgabenstellung | 2 |
| 1.2. Motivation | 2 |
| 1.3. Zielsetzung | 2 |
| 1.4. Gliederung | 2 |
| 1.5. ???Problemstellung?? | 2 |
| 2. Grundlagen | 5 |
| 2.1. Verfahren für die Reichweiten-Bestimmung | 5 |
| 2.2. Wahrscheinlichkeitstheorie | 5 |
| 2.3. Bayes/Kalman/Partikel Filter | 5 |
| 2.4. SLAM | 5 |
| 2.5. ROS | 5 |
| 3. Stand der Forschung und Technik | 7 |
| 4. Ultrabreitband | 9 |
| 4.1. Historie | 12 |
| 4.2. Alternative Technologien | 14 |
| 4.3. Gegenüberstellung | 14 |
| 4.4. Erstelle Hardware | 14 |
| 4.4.1. Elektrischer Aufbau | 14 |
| 4.4.2. Platinendesign | 14 |
| 4.4.3. Steuersoftware | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.4. Entfernungsmessung und Auswertung | 14 |
| 4.4.5. Kalibrierung | 14 |
| 5. RO-SLAM | 17 |
| 5.1. Roboterplattform | 17 |
| 5.2. Softwarearchitektur | 17 |
| 5.2.1. ROS Module | 17 |
| 5.2.2. MRPT Module | 17 |
| 6. Evaluation | 19 |
| 6.1. Versuchsaufbau | 19 |
| 6.2. Ergebnisse und Auswertung | 19 |
| 7. Zusammenfassung und Ausblick | 21 |
| 7.1. Zusammenfassung | 21 |
| 7.2. Ausblick | 21 |
| Literaturverzeichnis | 23 |
| Anhang | 27 |
| A. Blindtext Kapitel | 29 |
| A.1. Blindtext Abschnitt | 29 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| CUA Catholic University of America | 12 |
| DoD Department of Defense | 13 |
| FCC Federal Communications Commission | 13 |
| GSSI Geophysical Survey Systems Inc. | 13 |
| LLNL Lawrence Livermore National Laboratory | 12 |
| LANL Los Alamos National Laboratory | 12 |
| MIR Micropower Impulse Radar | 13 |
| SPI Serial Peripheral Interface | 1 |
| UWB Ultra-Wideband | 12 |
| USAF United States Air Force | 12 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|----------------------------|---|
| 1.1. a nice plot | 1 |
|----------------------------|---|

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|---|
| 1.1. Table to test captions and labels | 2 |
|--|---|

Einführung

Mit dem vorliegenden Artikel sollen die Einsatzmöglichkeiten der seriellen Kommunikation mit Peripheriegeräten mittels Serial Peripheral Interface (SPI) verdeutlicht werden.

Das SPI ist ein in den frühen 1980er Jahren von Motorola entwickeltes Bus-System mit einem „lockeren“ Standard für einen synchronen seriellen Datenbus (Synchronous Serial Port), mit dem digitale Schaltungen nach dem Master-Slave-Prinzip miteinander verbunden werden können.

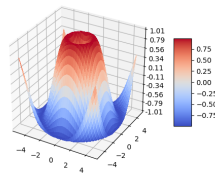


Abbildung 1.1.: a nice plot

As you can see in the figure 1.1, the function grows near 0. Also, in the page 1 is the same example.

The table 1.1 is an example of referenced \LaTeX elements.

| Col1 | Col2 | Col2 | Col3 |
|------|------|-------|------|
| 1 | 6 | 87837 | 787 |
| 2 | 7 | 78 | 5415 |
| 3 | 545 | 778 | 7507 |
| 4 | 545 | 18744 | 7560 |
| 5 | 88 | 788 | 6344 |

Tabelle 1.1.: Table to test captions and labels

1.1. Aufgabenstellung

1.2. Motivation

1.3. Zielsetzung

1.4. Gliederung

1.5. ???Problemstellung??

In der Zeit vor den Navigationsgeräten wurden auf deutschen Straßen noch regelmäßig faltbare Straßenkarten von den Beifahrern verwendet um den Fahrer den Weg zu weisen. Bevor eine Straßenkarten verwendet werden kann, muss diese Erstellt werden. Dieser Prozess ist unter dem Begriff Kartenerstellung (engl. Mapping) bekannt. Der Detailgrad hängt dabei stark vom Verwendungszweck ab. Der erste Schritt nach dem entfalten der Straßenkarten bestand in der Lokalisierung (engl. Localization), also der Bestimmung der ungefähren Fahrzeugposition und dem Ziel der Reise auf der Straßenkarte. Darauf aufbauend wurde vom Beifahrer dann eine Route zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Ziel geplant und während der Fahrt weiter verfolgt, was auch als Pfad-Planung (engl. Path-Planning) bekannt ist.

Genauso wie der menschliche Agent muss auch jeder mobile Roboter für sich diese grundlegende Frage beantworten können. „Wo bin ich?“, „Wo bin ich bereits gewesen?“, „Wohin gehe ich?“ und „Welcher ist der beste Weg dahin?“[1].

Außerhalb von geschlossenen Räumlichkeiten (engl. Outdoor) erfolgt die Lokalisierung in der Regel mittels GPS, unter der Voraussetzung das eine ungehinderte Verbindung zu den GPS-Satelliten möglich ist. Die Lokalisierung ist in diesem Fall sehr einfach, da die GPS Koordinaten eindeutig sind und das Kartenmaterial bereits im gleichen Koordinatensystem vorliegt.

Innerhalb geschlossener Räumlichkeiten (engl. Indoor), wie in öffentlichen Gebäuden, Logistikhallen oder auch in Bergwerken, ist eine Lokalisierung mittels GPS nicht mehr möglich. Erschwerend kommt dazu, dass es in der Regel zu diesen Räumlichkeiten keine öffentlich verfügbaren Karten gibt oder diese sich wie im letzten Beispiel häufig ändern. Aus diesem Problemfeld haben sich Algorithmen für die Simultane Lokalisierung und Kartenerstellen (engl. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)) entwickelt.

Häufig werden SLAM Algorithmen verwendet um aus Kamerabildern oder 360° Abstandsmessungen eine Karte der Umgebung zu erstellen und sich in der gleichen zu lokalisieren. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf den reinen Entfernungsbasierenden SLAM (engl. Range Only SLAM (RO-SLAM)) Algorithmen. Hierbei werden nur die Informationen der Eigenbewegung und die Entfernungen zu mehreren, vorher unbekannten, Basisstationen genutzt um sich selbst zu Lokalisieren und eine Karte mit den Positionen der Basisstationen zu erstellen.

2.

Grundlagen

2.1. Verfahren für die Reichweiten-Bestimmung

2.2. Wahrscheinlichkeitstheorie

2.3. Bayes/Kalman/Partikel Filter

2.4. SLAM

2.5. ROS

3.

Stand der Forschung und Technik

Einen guten Überblick über die Eigenschaften der Drahtlosen-Protokolle (engl. Wireless Protocols) Bluetooth, UWB, ZigBee und WiFi liefert die Arbeit [2] von Lee, Su und Shen.

In [3] wird das grundlegende Prinzip erklärt um aus mehreren bekannten Sensoren die Position eines beweglichen Empfängers zu berechnen.

Der theoretische Hintergrund des SLAM-Verfahrens wird in [4] vorgestellt. Zusätzlich wird bewiesen das die Unsicherheit bei der Kartenerstellung und Lokalisierung eine untere Schranke erreicht.

Kantor und Singh stellen in Ihrer Arbeit [5] ein Lokalisierungsverfahren vor, welches die Roboterposition anhand von Entfernungsmessungen zu vorher bekannten Landmarken bestimmen kann. Im letzten Abschnitt wird SLAM-Verfahren vorgestellt, welches über einen Kalman-Filter die Unsicherheit der Landmarkenposition modellieren kann.

Die Autoren Blanco, González und Fernández-Madrigal gehen in ihren Arbeiten [6, 7] einen Schritt weiter und bestimmen die unbekannte Roboterposition sowie die unbekannten Landmarkenpositionen. Hierzu nutzen Sie im ersten Schritt einen Partikelfilter (engl. Particle Filter) bis die Schätzung eine ausreichende Genauigkeit erreicht hat um dann im zweiten Schritt über einen Kalman-Filter ein Positionsverfolgung (engl. Position Tracking) durchzuführen.

Die Arbeit [8] von Ledergerber, Hamer und D'Andrea gehen auf die Roboterlokalisierung unter Verwendung einer One-Way Ultra-Wideband Kommunikation ein. Dieses hat den Vorteil, das mit sehr wenigen Landmarken eine große Anzahl von Roboter lokalisiert werden kann.

- The Cartesian EKF described above operates in the Cartesian space, we formulate our problem in polar coordinates. - The use of this parameterization derives motivation from the polar coordinate system, where annuli, crescents and other ringlike shapes can

be easily modeled. This parameterization is called Relative Over Parameterized (ROP) because it over parameterizes the state relative to an origin.

- EKF -> Polar EKF -> Multi-Hypothesis Filter - Partikel Filter

4.

Ultrabreitband

yavari2014ultra - Ultra wideband wireless positioning systems - The most important characteristic of UWB is large bandwidth in comparison with prevalent narrow-band systems. - One result of the large bandwidth of UWB is that due to the inverse relationship of time and frequency, the life-time of UWB signals is very short. Consequently, the time resolution of UWB signals is high and UWB is a good candidate for positioning systems.

[9] - Ultra-wideband communications: an idea whose time has come - UWB applications: short-range very high-speed broadband access to the Internet, covert communication links, localization at centimeter-level accuracy, high-resolution ground-penetrating radar, through-wall imaging, precision navigation and asset tracking, just to name a few. - UWB characterizes transmission systems with instantaneous spectral occupancy in excess of 500 MHz or a fractional bandwidth of more than 20- Such systems rely on ultra-short (nanosecond scale) waveforms that can be free of sine-wave carriers and do not require IF processing because they can operate at baseband. As information-bearing pulses with ultra-short duration have UWB spectral occupancy, UWB radios come with unique advantages that have long been appreciated by the radar and communications communities: i) enhanced capability to penetrate through obstacles; ii) ultra high precision ranging at the centimeter level; iii) potential for very high data rates along with a commensurate increase in user capacity; and iv) potentially small size and processing power. - This huge “new bandwidth” opens the door for an unprecedented number of bandwidth-demanding position-critical low-power applications in wireless communications, networking, radar imaging, and localization systems [64]. - These include short-range, high-speed access to the Internet, accurate personnel and asset tracking for increased safety and security, precision navigation, imaging of steel reinforcement bars in concrete or pipes hidden inside walls, surveillance, and medical monitoring of the heart’s actual contractions. - For wireless communications in particular, the FCC

regulated power levels are very low (below -41.3 dBm), which allows UWB technology to overlay already available services such as the global positioning system (GPS) and the IEEE 802.11 wireless local area networks (WLANs) that coexist in the 3.6–10.1 GHz band. Although UWB signals can propagate greater distances at higher power levels, current FCC regulations enable high-rate (above 110 MB/s) data transmissions over a short range (10–15 m) at very low power.

- Wireless personal area networks (WPANs): Also known as in-home networks, WPANs address short-range (generally within 10–20 m) ad hoc connectivity among portable consumer electronic and communication devices. They are envisioned to provide high-quality real-time video and audio distribution, file exchange among storage systems, and cable replacement for home entertainment systems. UWB technology emerges as a promising physical layer candidate for WPANs, because it offers high-rates over short range, with low cost, high power efficiency, and low duty cycle.
- Sensor networks: Sensor networks consist of a large number of nodes spread across a geographical area. The nodes can be static, if deployed for, e.g., avalanche monitoring and pollution tracking, or mobile, if equipped on soldiers, firemen, or robots in military and emergency response situations. Key requirements for sensor networks operating in challenging environments include low cost, low power, and multifunctionality. High data-rate UWB communication systems are well motivated for gathering and disseminating or exchanging a vast quantity of sensory data in a timely manner. Typically, energy is more limited in sensor networks than in WPANs because of the nature of the sensing devices and the difficulty in recharging their batteries. Studies have shown that current commercial Bluetooth devices are less suitable for sensor network applications because of their energy requirements [62] and higher expected cost [2]. In addition, exploiting the precise localization capability of UWB promises wireless sensor networks with improved positioning accuracy. This is especially useful when GPSs are not available, e.g., due to obstruction.
- Imaging systems: Different from conventional radar systems where targets are typically considered as point scatterers, UWB radar pulses are shorter than the target dimensions. UWB reflections off the target exhibit not only changes in amplitude and time shift but also changes in the pulse shape. As a result, UWB waveforms exhibit pronounced sensitivity to scattering relative to conventional radar signals. This property has been readily adopted by radar systems (see e.g., [5] and references therein) and can be extended to additional applications, such as underground, through-wall and ocean imaging, as well as medical diagnostics and border surveillance devices [55], [57].
- Vehicular radar systems: UWB-based sensing has the potential to improve the resolution of conventional proximity and motion sensors. Relying on the high ranging accuracy and target differentiation capability enabled by UWB, intelligent

collision-avoidance and cruise-control systems can be envisioned. These systems can also improve airbag deployment and adapt suspension/braking systems depending on road conditions. UWB technology can also be integrated into vehicular entertainment and navigation systems by downloading high-rate data from airport off ramp, road-side, or gas station UWB transmitters. - By its rulemaking proposal in 2002, the Federal Communications Commission (FCC) in the United States essentially unleashed huge “new bandwidth” (3.6–10.1 GHz) at the noise floor, where UWB radios overlaying coexistent RF systems can operate using low-power ultra-short information bearing pulses.

[10] - Impulse radio: How it works

[11] - Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology - In its infancy, UWB was commonly referred to as “carrier-free,” “baseband,” or “impulse,” reflecting the fact that the underlying signal generation strategy was the result of a broad-band extremely fast rise time, step, or impulse, which shock, or impulse, excited a wide-band antenna (e.g., TEM, mode horn). - The origins of UWB technology stem from work in time-domain electromagnetics begun in the early 1960s to fully describe the transient behavior of certain classes of microwave networks by examining their characteristic impulse response [7]–[12]. - For up until 1962, there were no convenient means to observe, let alone measure, waveforms having subnanosecond durations, as we were required to suitably approximate an ideal impulsive excitation. Fortunately, at about the same time [15], Hewlett-Packard introduced the time-domain sampling oscilloscope, which greatly facilitated these measurements. - The last element that needed to be developed before real system development could begin was the short-pulse, or threshold, receiver. In the early 1970s, both avalanche transistor and tunnel diode detectors were constructed in attempts to detect these very short duration signals. The tunnel diode, invented in 1957 by Esaki who would later receive the Nobel Prize in physics in 1973 for this accomplishment, was the first known practical application of quantum physics. This unique device, with its extremely wide bandwidth (at the time, tens of gigahertz) permitted not only subnanosecond pulse generation essential for impulse excitation, but also could be used as a sensitive thresholding device for the detection of short-pulse waveforms.

Medical applications of ultra-wideband (UWB) - [12]

[13] - Ultra wideband communications: History, evolution and emergence - Figure 1 und 2 sind gut - The development of the sampling oscilloscope in the early 1960s and the corresponding techniques for generating sub-nanosecond baseband pulses speed up the development of UWB [1].

[14] - Ultra wideband systems: technologies and applications - The FCC’s definition

of the criteria for devices operating in the UWB spectrum purposely did not specify the techniques related to the generation and detection of RF energy; rather, it mandated compliance with emission limits that would enable coexistence and minimize the threat of harmful interference with legacy systems, thus protecting the Global Positioning System (GPS), satellite receivers, cellular systems, and others. - Interest in the technology has been steady, with more than 200 technical papers published in journals between 1960 and 1999 on the topic and more than 100 U.S. patents issued on UWB or UWB-related technology[3].

4.1. Historie

Die Ursprünge der Ultra-Wideband (UWB) technologie liegen in dem “spark gap transmission designs” von Guglielmo Marconi in den späten 1890er Jahren und in der erfolgreichen “cross-Atlantic” Übertragung mit der Verwendung der “spark” Technik im Jahre 1901. [11]

Vor der 1960er Jahren war die dominierte Funkübertragungsform sinusförmig. [13]

Die Erforschung der UWB Technologie gehen auf die Anfänge der 1960er Jahre zurück. Zu diesem Zeitpunkt versuchte man die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nicht nur im Frequenz- sondern auch im Zeitbereich zu untersuchen. [11, 13, 15]

Grundlegende Erkenntnisse wurden dabei von Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) und Los Alamos National Laboratory (LANL) im Bereich “pulse transmitters”, “receivers” und “antennas” erforscht.

Durch die Einführung der “time-domain sampling oscilloscopes” im Jahre 1962 durch Tektronix und Hewlett-Packard war es zum ersten Mal möglich eine UWB Wellenform aufzufangen und anzuzeigen. Dieses wurde erst durch den Einsatz von Avalanche-Transistoren und Tunnel-Dioden möglich. (high-speed triggering and detection) [11, 13, 14]

Ab dem Jahre 1964 produzierten dann beide Hersteller Messgeräte für die Diagnose im Zeitbereich. [16]

Im Jahre 1973 wurde das erste grundlegende Patent (3,728,632) von Ross für die UWB Kommunikation eingereicht/gewährt. [9, 11, 16]

Die wichtigsten Patente für die UWB Kommunikation- und Radarsysteme wurden von Harmuth an der Catholic University of America (CUA), Ross und Robbins bei der Sperry Rand Corp. and Paul van Etten an der United States Air Force (USAF) im Rome Air Development Center eingereicht. [16]

Somit waren in den Anfängen der 1970er Jahre alle Grundsteine für ein UWB System für Kommunikation- bzw. Radaranwendungen gelegt.[16]

Im Jahre 1974 fertige Morey ein UWB Radarsystem für die “Ground Penetration” welche zu einem kommerziellen Erfolg bei der Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) führte. [16]

In dem Zeitraum 1977 bis 1989 mehrere Workshops organisiert, darunter auch beim US-amerikanisch Department of Defense (DoD), um das grundlegende Verständnis für die Physik hinter der “short pulse transmissions” zu erörtern, die sich grundlegend von der “continuous” bzw. “long pulse signals” unterscheidet. [16]

Ab dem Jahre 1989 wurde der Name UWB durch das US-amerikanisch DoD geprägt. Diese Definition galt für alle Geräte die mindestens eine Bandbreite von 1,5 GHz bzw. mindestens 25 % der “Fractional Bandwidth” belegt. Vorher war die Technologie nur unter den Synonymen “baseband communication”, “carrier free communication”, “impulse radio”, “large relative bandwidth communication”, “nonsinusoidal communication”, “orthogonal functions”, “sequence theory”, “time domain”, “large-relative-bandwidth radio/radar signals”, “video-pulse transmission” und/oder “Walsh waves communication” bekannt. [9, 11, 14, 15, 17]

Das Militär hatte dabei für sich die Anwendungsfälle im Bereich Radar und hochsicherheitskommunikation entdeckt.[15]

Im Jahre 1994 wurde von T.E. McEwan an der LLNL das Micropower Impulse Radar (MIR) erfunden. Hierbei handelte es sich um ein UWB Radar, das mit den folgenden Eigenschaften aufwartete. Sehr geringer Energieverbrauch im Bereich von Mikrowatt, d.h. es stand einer batteriebetriebenen Anwendung nichts im Wege. Zusätzlich war es sehr kompakt und zum anderen kostengünstig in der Herstellung. (The methods of reception of this design also permitted for the first time extremely sensitive signal detection.) [16]

Ab dem Jahre 1998 beschäftigte sich die Federal Communications Commission (FCC) mit einer Standardisierung der UWB Nutzung. Im Jahre 2002

Vor dem Jahre 2001 war die Verwendung von UWB auf Radarsystem beschränkt die größtenteils in Militärischen Anwendungen Verwendung fanden.[9]

Das änderte sich im Jahre 2002, als die FCC in Amerika große Frequenzbereiche (3,6 GHz–10,1 GHz) für die kommerzielle Nutzung freigegeben hat, siehe First Report and Order (R&O). Danach wurden auch Anwendungen im Bereich “Imaging systems”, “communication and measurement systems” und “vehicular radar systems” möglich.[9]

Weitere Staaten folgten der FCC Regulierung und gaben ebenfalls große Frequenzbereiche für die UWB Technologie frei. Details zu einzelnen Staaten, siehe [18].

4.2. Alternative Technologien

Einen guten Überblick über die Eigenschaften der Drahtlosen-Protokolle (engl. Wireless Protocols) Bluetooth, UWB, ZigBee und WiFi liefert die Arbeit [2] von Lee, Su und Shen.

qigao2015tightly - Tightly Coupled Model for Indoor Positioning based on UWB/INS

4.3. Gegenüberstellung

4.4. Erstelle Hardware

Vor der Herstellung der UWB-Module werden die Produktspezifikationen des Herstellers untersucht um aus diesen die notwendige Beschaltung herzuleiten, siehe [19, 20]. Zusätzlich werden Erfahrungsberichte aus dem Internet ausgewertet um die Beschaltung weiter zu verfeinern, siehe [21–23].

Der initiale Aufbau erfolgt zu Evaluationszwecken auf einem Steckboard und zusätzlich auf einer separaten Lochstreifenplatine um das Zusammenspiel zweier UWB-Module zu testen. Nach dem erfolgreichen Systemtest wird aus dem erstellten Schaltplan, ein PCB-Layout erstellt, mehrere PCB-Boards bestellt und nach der Lieferung zusammengebaut und noch mal getestet.

4.4.1. Elektrischer Aufbau

4.4.2. Platinendesign

4.4.3. Steuersoftware

4.4.4. Entfernungsmessung und Auswertung

Der Überblick und Vergleich der verschiedenen Abstandsbestimmungsverfahren erfolgt über eine klassische Literatursuche, siehe [2, 24, 25].

isaacs2009optimal - Optimal sensor placement for time difference of arrival localization

4.4.5. Kalibrierung

Das Verfahren zur Kalibrierung der Antennenverzögerung kann ebenfalls der Hersteller-Dokumentation entnommen werden, siehe [26]. Hierfür muss ein Versuchsaufbau erstellt werden. Zusätzlich wird eine Anpassung der Steuer-/Auswerte-Software notwendig, um die Verzögerung zu berechnen.

Die Genauigkeitsbestimmung der Entfernungsmessung mit LOS und NLOS wird über einen Versuchsaufbau realisiert. Hierfür werden mehrere Messreihen in verschiedenen Abständen aufgenommen und mit der tatsächlichen Entfernung verglichen.

5.

RO-SLAM

5.1. Roboterplattform

5.2. Softwarearchitektur

5.2.1. ROS Module

5.2.2. MRPT Module

6.

Evaluation

6.1. Versuchsaufbau

6.2. Ergebnisse und Auswertung

7.

Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

7.2. Ausblick

Literaturverzeichnis

- [1] Robin Murphy. *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2000.
- [2] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su und Chung-Chou Shen. „A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi“. In: *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. Ieee. 2007, S. 46–51.
- [3] Julius Smith und Jonathan Abel. „Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements“. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 35.12 (1987), S. 1661–1669.
- [4] MWM Gamini Dissanayake u. a. „A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem“. In: *IEEE Transactions on robotics and automation* 17.3 (2001), S. 229–241.
- [5] George Kantor und Sanjiv Singh. „Preliminary results in range-only localization and mapping“. In: *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. Bd. 2. Ieee. 2002, S. 1818–1823.
- [6] Jose-Luis Blanco, Javier González und Juan-Antonio Fernández-Madrigal. „A pure probabilistic approach to range-only SLAM“. In: *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. IEEE. 2008, S. 1436–1441.
- [7] Jose-Luis Blanco, Juan-Antonio Fernández-Madrigal und Javier González. „Efficient probabilistic range-only SLAM“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2008, S. 1017–1022.
- [8] Anton Ledergerber, Michael Hamer und Raffaello D'Andrea. „A robot self-localization system using one-way ultra-wideband communication“. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2015, S. 3131–3137.

- [9] Liuqing Yang und G. B. Giannakis. „Ultra-wideband communications: an idea whose time has come“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 21.6 (Nov. 2004), S. 26–54. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140.
- [10] Moe Z Win und Robert A Scholtz. „Impulse radio: How it works“. In: *IEEE Communications letters* 2.2 (1998), S. 36–38.
- [11] Robert J Fontana. „Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology“. In: *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 52.9 (2004), S. 2087–2104.
- [12] Jianli Pan. „Medical applications of ultra-wideband (UWB)“. In: *Survey Paper* (2007). URL: <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/usb/>.
- [13] V Lakkundi. „Ultra wideband communications: History, evolution and emergence“. In: *Acta Polytechnica* 46.4 (2006).
- [14] Roberto Aiello und Anuj Batra. *Ultra wideband systems: technologies and applications*. Newnes, 2006.
- [15] Amr Eltaher und Thomas Kaiser. „Positioning of robots using ultra-wideband signals“. In: *IRA workshop on Advanced control and Diagnosis*. 2004.
- [16] Terence W Barrett und VA Vienna. „Technical features, history of ultra wideband communications and radar: part I, UWB communications“. In: *Microw J* 44.1 (2001), S. 22–56.
- [17] Charles Fowler, John Entzminger, JAMES Corum u. a. „Assessment of ultra-wideband(UWB) technology“. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 5.11 (1990), S. 45–49.
- [18] *UWB Regulations. A Summary of Worldwide Telecommunications Regulations governing the use of Ultra Wideband*. Version 1.0. DecaWave Limited, 2015. URL: https://www.decawave.com/sites/default/files/apr001_usb_worldwide_regulations_summary.pdf (besucht am 13.12.2017).
- [19] *DWM1000 Datasheet*. Version 1.6. DecaWave Limited, 2016. URL: <https://www.decawave.com/application-notes>.
- [20] *DW1000 power source selection guide*. Version 1.10. DecaWave Limited, 2013. URL: <https://www.decawave.com/application-notes>.
- [21] Thomas Trojer. *thotro/arduino-dw1000. A library that offers functionality to use Decawave’s DW1000 chips/modules with Arduino*. 2015. URL: <https://github.com/thotro/arduino-dw1000>.

-
- [22] Wayne Holder. *UWB Ranging with the DecaWave DWM1000*. 2016. URL: <https://sites.google.com/site/wayneholder/uwb-ranging-with-the-decawave-dwm1000>.
 - [23] Wayne Holder. *UWB Ranging with the DecaWave DWM1000 - Part II*. 2016. URL: <https://sites.google.com/site/wayneholder/uwb-ranging-with-the-decawave-dwm1000---part-ii>.
 - [24] F Herranz u. a. „Studying of WiFi range-only sensor and its application to localization and mapping systems“. In: *IEEE ICRA*. 2010, S. 115–120.
 - [25] Reza Zekavat und R Michael Buehrer. *Handbook of position location: Theory, practice and advances*. Bd. 27. John Wiley & Sons, 2011.
 - [26] *Antenna delay calibration of DW1000-based products and systems*. Version 1.01. DecaWave Limited, 2014. URL: https://www.decawave.com/sites/default/files/aps014-antennadelaycalibrationofdwm1000-basedproductsandsystems_v1.01.pdf (besucht am 13.12.2017).
 - [27] Ciaran McElroy, Dries Neiryneck und Michael McLaughlin. „Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems“. In: *Communications Workshops (ICC), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE. 2014, S. 157–162.
 - [28] Fernando Herranz u. a. „A comparison of slam algorithms with range only sensors“. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE. 2014, S. 4606–4611.
 - [29] Javier González u. a. „Mobile robot localization based on ultra-wide-band ranging: A particle filter approach“. In: *Robotics and autonomous systems* 57.5 (2009), S. 496–507.
 - [30] Hugh Durrant-Whyte und Tim Bailey. „Simultaneous localization and mapping: part I“. In: *IEEE robotics & automation magazine* 13.2 (2006), S. 99–110.
 - [31] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard und Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
 - [32] Jens Schroeder, Stefan Galler und Kyandoghene Kyamakya. „A low-cost experimental ultra-wideband positioning system“. In: *Ultra-Wideband, 2005. ICU 2005. 2005 IEEE International Conference on*. IEEE. 2005, S. 632–637.

- [33] Adam Smith u. a. „Tracking moving devices with the cricket location system“. In: *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*. ACM. 2004, S. 190–202.

Anhang



Blindtext Kapitel

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

A.1. Blindtext Abschnitt

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Das hier ist der zweite Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informa-

tionen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Und nun folgt – ob man es glaubt oder nicht – der dritte Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Nach diesem vierten Absatz beginnen wir eine neue Zählung. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.