

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, 11. 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	11
4.2. Alternative Technologien	16
4.3. Gegenüberstellung	16
4.4. Erstelle Hardware	16
4.4.1. Elektrischer Aufbau	17
4.4.2. Platinendesign	17
4.4.3. Steuersoftware	17

4.4.4. Entfernungsmessung und Auswertung	17
4.4.5. Kalibrierung	17
5. RO-SLAM	19
5.1. Roboterplattform	19
5.2. Softwarearchitektur	19
5.2.1. ROS Module	19
5.2.2. MRPT Module	19
6. Evaluation	21
6.1. Versuchsaufbau	21
6.2. Ergebnisse und Auswertung	21
7. Zusammenfassung und Ausblick	23
7.1. Zusammenfassung	23
7.2. Ausblick	23
Literaturverzeichnis	25
Anhang	29
A. Blindtext Kapitel	31
A.1. Blindtext Abschnitt	31

Abkürzungsverzeichnis

SPI Serial Peripheral Interface	1
--	---

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.

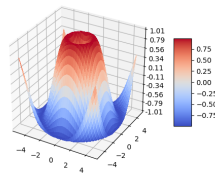


Abbildung 1.1.: a nice plot

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.

[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 were required to suitably approximate an ideal impulsive excitation. Fortuitously, 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]

Ultra wideband communications: History, evolution and emergence - [13]

4.1. Historie

[14] - Positioning of robots using ultra-wideband signals - The origins of UWB technology lie in early work on time domain electromagnetics, which began in the early 1960s [4]. - In 1989 the term ‘ultra wide-band’ or ‘UWB’, was coined by the Department of Defense and since 1994 development work has been carried out for civil applications. - Until 1994

the core technology was developed variously as 'baseband', 'carrier-free' or 'impulse' communications under classied research programmes carried out by the US Department of Defense, which had identified its particular suitability for radar and highly secure communications [4]. - DONE!

[9] - Ultra-wideband communications: an idea whose time has come - 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. - Despite these attractive features, interest in UWB devices prior to 2001 was primarily limited to radar systems, mainly for military applications. With bandwidth resources becoming increasingly scarce, UWB radio was "a midsummer night's dream" waiting to be fulfilled. But things changed drastically in the spring of 2002, when the FCC released a spectral mask allowing (even commercial) operation of UWB radios at the noise floor, but over an enormous bandwidth (up to 7.5 GHz). - When invented by Guglielmo Marconi more than a century ago, radio communications utilized enormous bandwidth as information was conveyed using spark-gap transmitters. - <https://www.youtube.com/watch?v=YSf93g0heUA> - The next milestone of UWB technology came in the late 1960s, when the high sensitivity to scatterers and low power consumption motivated the introduction of UWB radar systems [5], [45], [46]. - Ross' patent in 1973 set up the foundation for UWB communications. Readers are referred to [5] for an interesting and informative review of pioneer works in UWB radar and communications. - In 1989, the U.S. Department of Defense (DoD) coined the term "ultra wideband" for devices occupying at least 1.5 GHz, or a -20 dB fractional bandwidth exceeding 25- Similar definitions were also adopted by the FCC notice of proposed rule making that regulated UWB recently. The rule making of UWB was opened by FCC in 1998. The resulting First Report and Order (R&O) that permitted deployment of UWB devices was announced on 14 February and released in April 2002 [12]. Three types of UWB systems are defined in this R&O: imaging systems, communication and measurement systems, and vehicular radar systems. Spectral masks assigned to these applications are listed in Table 1. In particular, the FCC assigned bandwidth and spectral mask for indoor communications is illustrated in Figure 1. - Although currently only the United States permits operation of UWB devices, regulatory efforts are under way both in Europe and in Japan. - Wie sieht es 2017 aus? - DONE!

[15] - Assessment of ultra-wideband(UWB) technology (Military) - DONE!

[16] - Ultra wideband systems: technologies and applications - The term ultra wideband was coined in the late 1980s, apparently by the U.S. Department of Defense [1], and

the actual technology behind UWB has been known by many other names throughout its history, including baseband communication, carrier free communication, impulse radio, large relative bandwidth communication, nonsinusoidal communication, orthogonal functions, sequency theory, time domain, video-pulse transmission, and Walsh waves communication [2]. - 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]. In 1945, Conrad H. Hoepfner filed for another UWB-related patent (which was granted in 1961) for a pulse communication system that reduces interference and jamming [4]. - Spectrum allocation by the FCC - 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. - The concept of multiband is to break the available spectrum into subbands (each at least 500 MHz wide because of the FCC ruling) and to communicate in those independently. - Moving forward, the coalition members recognized that their audience shared a common goal: securing an industry standard that would help produce the best possible physical layer (PHY) specification. - The basic concept behind multiband OFDM divides spectrum into several 528 MHz bands (with each occupying more than 500 MHz at all times in order to comply with FCC regulations). - While the work in UWB theory was demonstrating that studying responses in the time domain was the right approach, measuring them was an entirely different matter. Barney Oliver at Hewlett-Packard broke the first logjam in 1962 with the development of the sampling oscilloscope. When combined with the technique of using avalanche transistors and tunnel diodes to generate very short pulses, the oscilloscope made it possible to observe and measure the impulse response of microwave networks directly. - In the late 1960s, Tektronix developed commercial sample-and-hold receivers. Although not designed for UWB, these receivers used a technique that could be used to enable UWB signal averaging. (The sampling circuit is a transmission gate followed by a short-term integrator [6].) - DONE!

[11] - Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology - The origins of the technology stem from work in the early 1960s on time-domain electromagnetics [1], the study of electromagnetic-wave propagation as viewed from a time domain, rather than from the more common frequency-domain perspective. - In fact, one might reasonably argue that UWB actually had its origins in the spark gap transmission

designs of Marconi in the late 1890s and in his celebrated cross-Atlantic transmission using spark techniques on December 12, 1901. - The term “UWB” originated with the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) in a radar study undertaken in 1990, serving as a convenient means for discriminating between conventional radar and those utilizing short-pulse waveforms having a large fractional bandwidth (i.e., 25- The first (1973) fundamental patent on UWB communications systems simply referred to the technology as “base-band pulse” [5]. - Fig. 21 illustrates a few of the more recent systems designs. The soldier tracking system was the first to be developed and fielded, and was designed to track personnel and vehicles without the use of GPS over areas exceeding a few square kilometers. The system was tested at the Ft. Benning, GA, McKenna military operations in urban terrain (MOUT) site in 1997 and demonstrated the ability to achieve foot-type resolutions over a 4-km area. A smaller version of this system was subsequently developed in 1998 to perform indoor mapping, wherein the UWB tracking system was used to correlate position information with video still imagery to construct a 3-D AutoCAD model of the inside of a facility. A further size reduction and improvement in performance resulted in development in 2002 of the precision asset location system (PALS) [38], which was used for tracking of ISO containers inside a Navy ship, a particularly severe multipath environment with all metal floors, walls, and ceilings - In 1962, both Tektronix and Hewlett-Packard introduced time-domain sampling oscilloscopes based upon the tunnel diode for high-speed triggering and detection, first enabling the capture and display of UWB waveforms. The successful implementation of a sensitive portable short-pulse receiver [17] further accelerated system development. Early UWB receiverwork culminated in the development by Nicolson and Mara [18] of the tunnel diode constant false-alarm rate (CFAR) receiver, with improved versions still in use today [19], [20]. - DONE!

[17] - Technical features, history of ultra wideband communications and radar: part I, UWB communications - The term ultra wideband or UWB signal has come to signify a number of synonymous terms such as impulse, carrier-free, baseband, time domain, non-sinusoidal, orthogonal function and large-relative-bandwidth radio/radar signals. Here, the term UWB includes all of these. (The term ultra wideband, which is somewhat of a misnomer, was not applied to these systems until about 1989, apparently by the US Department of Defense.) - Contributions to the development of a field addressing UWB RF signals commenced in the late 1960s with the pioneering contributions of Harmuth at Catholic University of America, Ross and Robbins at Sperry Rand Corp., Paul van Etten at the US Air Force’s (USAF) Rome Air Development Center, and in Russia. The Harmuth books and published papers, 1969-1984, placed in the public domain the basic

design for UWB transmitters and receivers. - At approximately the same time, the Ross and Robbins (R&R) patents, 1972-1987, pioneered the use of UWB signals in a number of application areas, including communications and radar, and also using coding schemes. Ross' US Patent 3,728,632, dated 17th April, 1973, is a landmark patent in UWB communications. Both Harmuth and R&R applied the 50 year-old concept of matched filtering to UWB systems. - Van Etten's empirical testing of UWB radar systems resulted in the development of system design and antenna concepts (Van Etten, 1977). In 1974 Morey designed a UWB radar system for penetrating the ground, which was to become a commercial success at Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI). Other subsurface UWB radar designs followed (for example, Moffat & Puskar, 1976). - The commercial development of sample and hold receivers (mainly for oscilloscopes) at Tektronix Inc. in the late 1960s, for example, also aided the developing UWB field. For example, the Tektronix time domain receiver plug-in, model 7S12, utilized a technique which enabled UWB signal averaging – the sampling circuit is a transmission gate followed by a short-term integrator (Tektronix, 1968). Other advances in the development of the sampling oscilloscope were made at the Hewlett Packard Co. These approaches were imported to UWB designs. Beginning in 1964, both Hewlett Packard and Tektronix produced the first time domain instruments for diagnostics. - In the 1960s both Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and Los Alamos National Laboratory (LANL) performed original research on pulse transmitters, receivers and antennas. - Thus, by the early 1970s, the basic designs for UWB signal systems were available, and there remained no major impediment to progress in perfecting such systems. In fact, by 1975 a UWB system – for communications or radar – could be constructed from components purchased from Tektronix. After the 1970s, the only innovations in the UWB field could come from improvements in particular instances of subsystems, but not in the overall system concept itself, nor even in the overall subsystems' concepts. - From 1977 to 1989, there was a USAF program in UWB system development headed by Col. J.D. Taylor. By 1988 the present author was able to organize a UWB workshop for the US Department of Defense's DDR&E, which welcomed over 100 participants (Barrett, 1988). There were also very active academic programs (for example, at LLNL, LANL, University of Michigan, University of Rochester and Polytechnic University) which focused on the interesting physics of short pulse transmissions that differed from the physics of continuous or long pulse signals, especially with respect to interactions with matter.³ - In 1994, T.E. McEwan, then at LLNL, invented the micropower impulse radar (MIR), which provided for the first time a UWB operating at ultra low power, besides being extremely compact and inexpensive (McEwan, 1994, 2000). This was the first UWB radar to operate on

only microwatts of battery drain. The methods of reception of this design also permitted for the first time extremely sensitive signal detection. - Thus, by the early 1970s the basic designs for UWB signal systems, for radar or communications, were available and there remained no major impediment to progress in perfecting such systems. - After the 1970s, the only innovations in the UWB field could come from improvements in particular instances of subsystems, but not in the overall system concept itself, or even in the overall subsystems' concepts. The basic components were known, including pulse train generators, pulse train modulators, switching pulse train generators, detection receivers and wideband antennas. - DONE!

[13] - Ultra wideband communications: History, evolution and emergence - However, the dominant form of wireless communications became sinusoidal, and it was not until the 1960s that work began again in earnest on time domain electromagnetics. The development of the sampling oscilloscope in the early 1960s and the corresponding techniques for generating sub-nanosecond baseband pulses sped up the development of UWB [1]. - DONE!

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 [18, 19]. Zusätzlich werden Erfahrungsberichte aus dem Internet ausgewertet um die Beschaltung weiter zu verfeinern, siehe [20–22].

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, 23, 24].

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 [25]. 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/uwb/>.
- [13] V Lakkundi. „Ultra wideband communications: History, evolution and emergence“. In: *Acta Polytechnica* 46.4 (2006).
- [14] Amr Eltaher und Thomas Kaiser. „Positioning of robots using ultra-wideband signals“. In: *IRA workshop on Advanced control and Diagnosis*. 2004.
- [15] 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.
- [16] Roberto Aiello und Anuj Batra. *Ultra wideband systems: technologies and applications*. Newnes, 2006.
- [17] 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.
- [18] *DWM1000 Datasheet*. Version 1.6. DecaWave Limited, 2016.
- [19] *DW1000 power source selection guide*. Version 1.10. DecaWave Limited, 2013.
- [20] 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>.
- [21] Wayne Holder. *UWB Ranging with the DecaWave DWM1000*. 2016. URL: <https://sites.google.com/site/wayneholder/uwb-ranging-with-the-decawave-dwm1000>.
- [22] 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>.

-
- [23] 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.
 - [24] Reza Zekavat und R Michael Buehrer. *Handbook of position location: Theory, practice and advances*. Bd. 27. John Wiley & Sons, 2011.
 - [25] *Antenna delay calibration of DW1000-based products and systems*. Version 1.01. DecaWave Limited, 2014.
 - [26] 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.
 - [27] 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.
 - [28] 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.
 - [29] Hugh Durrant-Whyte und Tim Bailey. „Simultaneous localization and mapping: part I“. In: *IEEE robotics & automation magazine* 13.2 (2006), S. 99–110.
 - [30] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard und Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
 - [31] 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.
 - [32] 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.