HOCHSCHULE KONSTANZ TECHNIK, WIRTSCHAFT UND GESTALTUNG
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Realzeitsysteme

Realzeitnachweis

Manuel Vögele, Simon Wörner und Siegfried Kienzle

Konstanz, den July 10, 2017

Contents

Chapter 1

Entwurf Hardware

1.1 Verwendete Sensoren

In diesem Projekt werden alle vorgegebenen Sensoren wie Infrarot, RFID-Reader und Ultraschall-Sensoren verwendet.

1.2 Probleme

Ultraschall

Bei der Verwendung eines einzelnen Ultraschallsensors haben wir Probleme bei der Erkennung von Wänden festgestellt, wenn der Roboter nicht orthogonal auf die Wand zufährt. Das lässt sich durch den geringen Winkel der Ultraschallmessung und die hohe gemessene Entfernung, wenn fast parallel auf die Wand zugefahren wird, erklären.

Deshalb kommt bei unserem Projekt anstatt einem, ein zweiter Ultraschall-Sensor zum Einsatz. Diese sollen im Zusammenspiel, die Detektion der Wände merklich verbessern. Es wurde nicht, wie ursprünglich vorgesehen ein Sensor in der Mitte, sondern der eine Sensor am rechten und der Andere am linken Rand befestigt. Diese Konstruktion deckt nun einen großen Bereich ab, allerdings entsteht in der Mitte dennoch ein minimaler toter Winkel, der nicht detektiert werden kann.

Hinterrad

Die Ausrichtung des Hinterrades verändert die Fahrtrichtung merklich, deshalb ist das Fahrverhalten bei weitem nicht deterministisch. Um das Fahrverhalten zu verbessern wurde das Hinterrad mittels eines Gummibandes fixiert.

Notaus

Der Notaus-Knopf führte häufig zu false positives aufgrund von Vibration während der Fahrt und statischer Aufladung der Stange, auf welcher der Knopf befestigt wurde.

Dieses Problem konnte gelöst werden durch kleben des Notaus an die Stange und Isolation der Kontakte mittels Klebeband.

Chapter 2

Zeitmessungen

2.1 Software Komponenten

In folgenden beiden Grafiken ist unser System einmal ohne Last (2.1) und einmal mit Last (2.2) zu sehen. Dort sind zwei Boxplots abgebildet. Diese Boxen bilden den Bereich von 25 % bis 75 % der Messwerte ab. In der Mitte ist ein roter Strich zu sehen, der von der oberen Linie bis zur unteren Linie vertikal verläuft. Dieser Strich ist der Median der Messwerte. Der Median bedeutet in diesem Fall, dass von allen Werten genau der in der Mitte befindliche Wert genommen wird. (Bsp.: 10 Werte und davon der 5. Wert)

Gemessen wurde mit der eingebauten Measure-Klasse (*kawaii/kawaii-rs/dependencies/kawaii-rs/src/measure.rs*). Diese kann über die Compiler Umgebungsvariable *MEASURE* aktiviert werden.

Last wurde mittels des Tools *stress* auf I/O, CPU und Memory erzeugt.

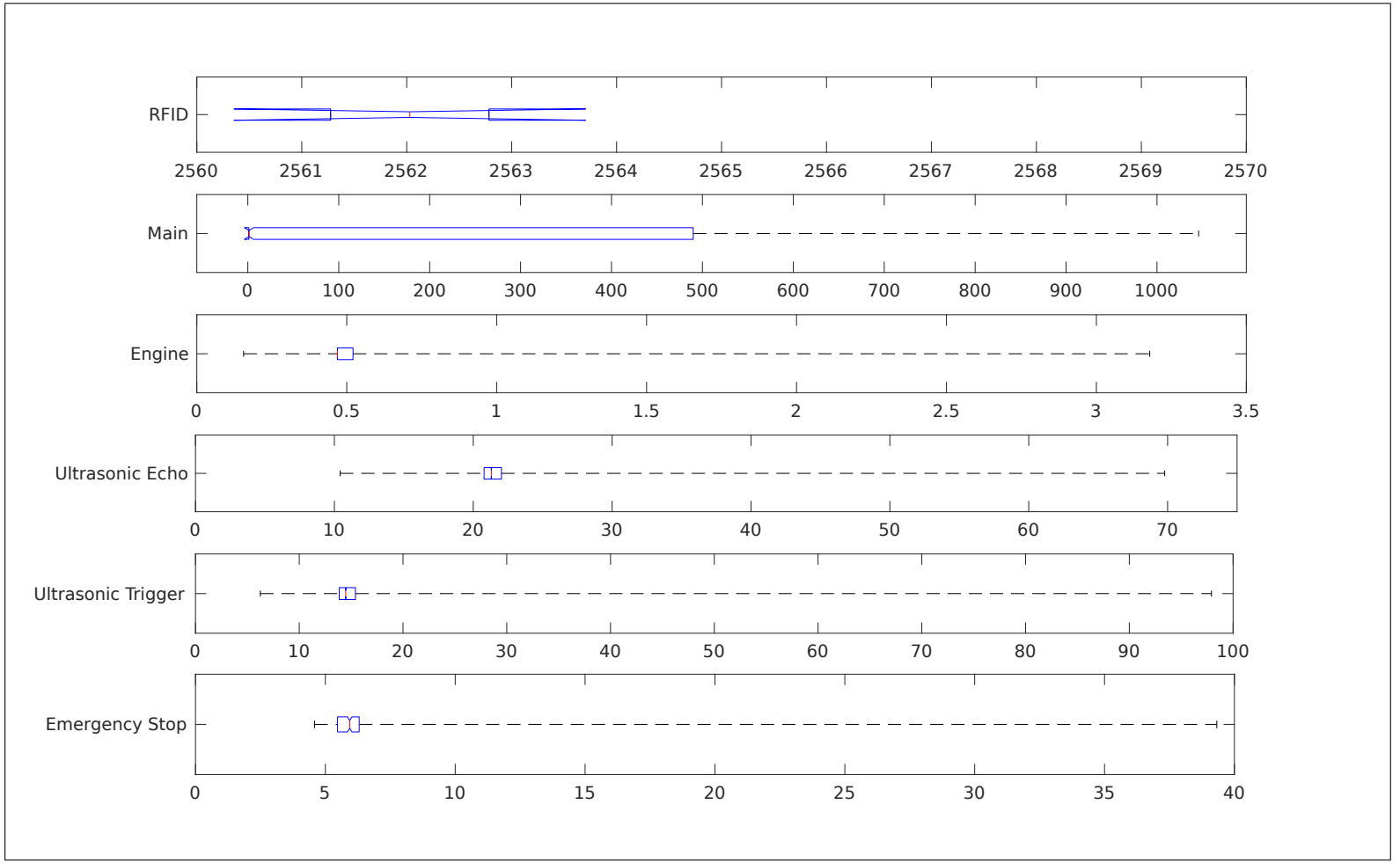


Figure 2.1: **ohne Last**

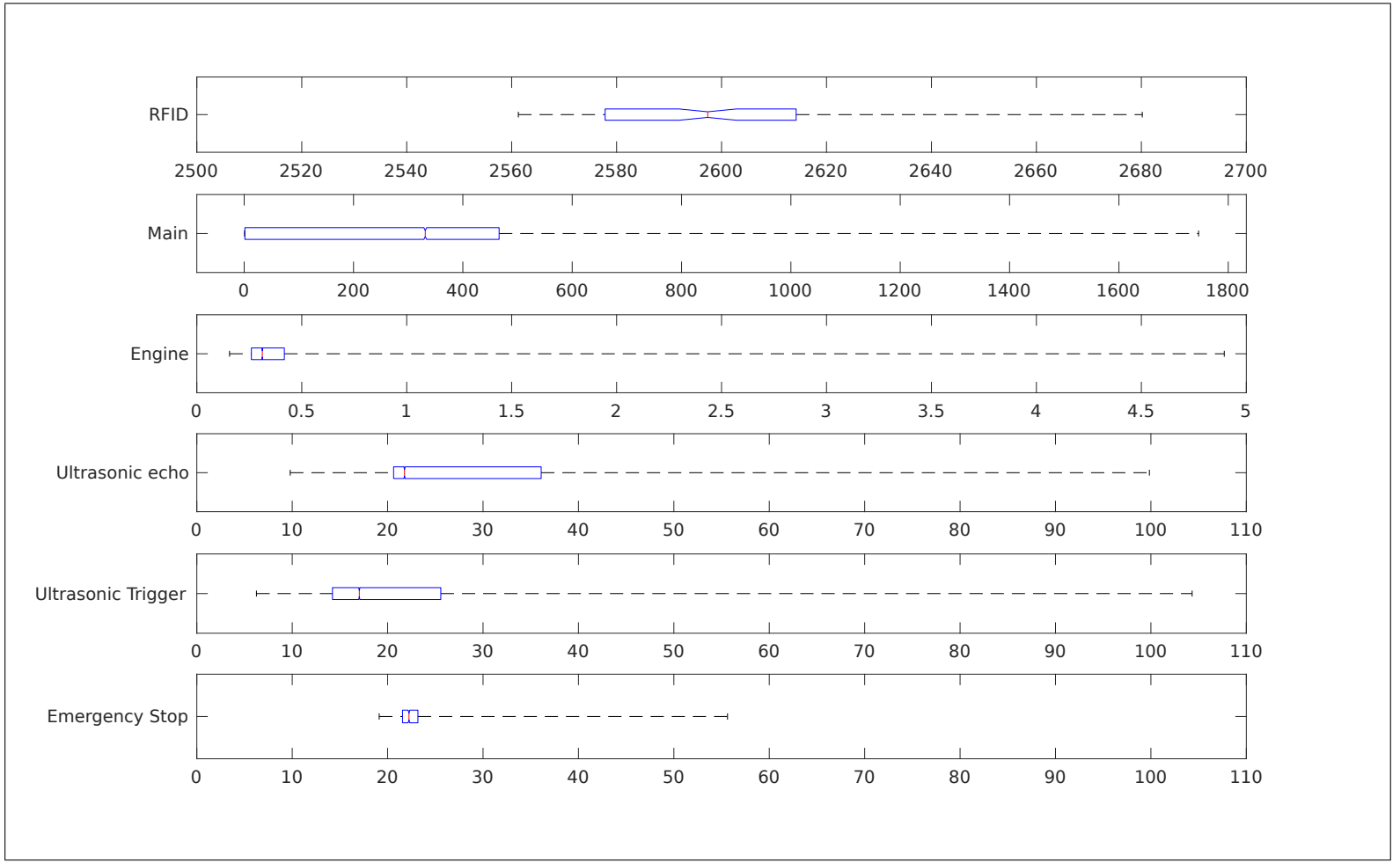


Figure 2.2: **mit Last**

2.2 Testfahrt

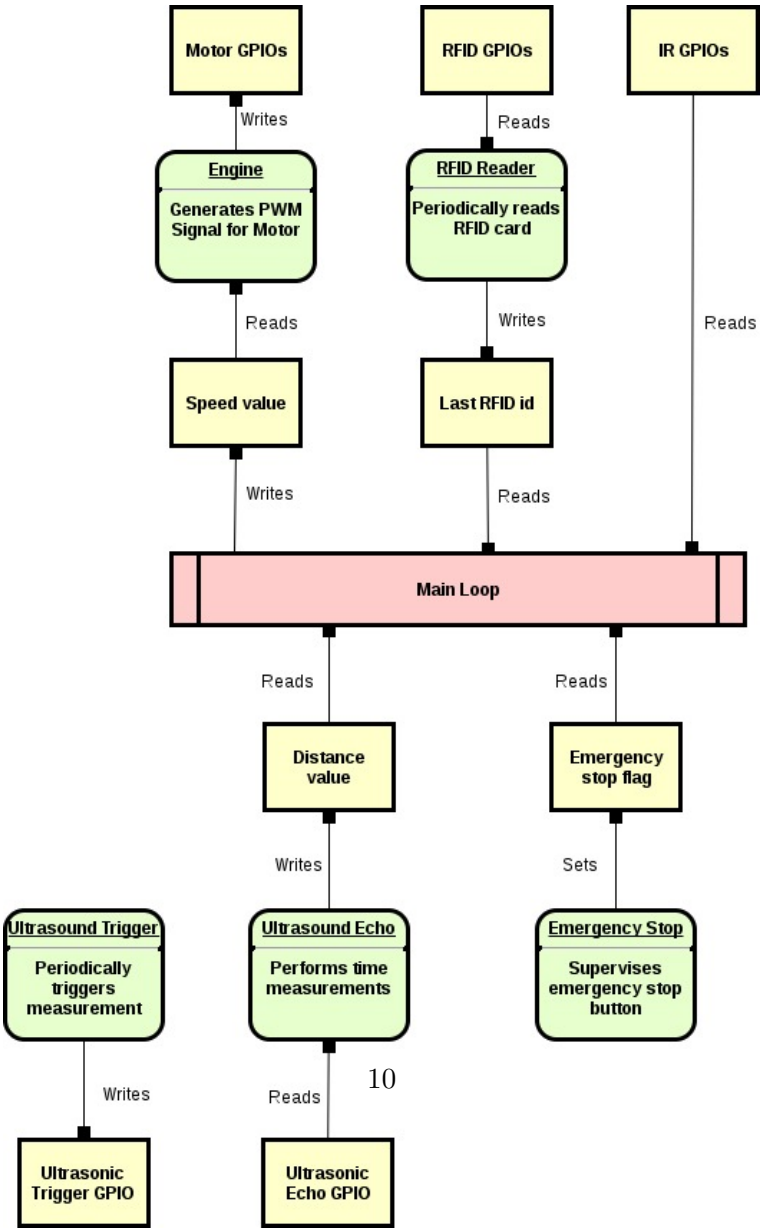
Bei unseren Testfahrten ergab der Mittelwert beim Abfahren des Labyrinths rund $20s$ und die anschließende Suche nach den RFID-Chips eine Zeit von Durchschnittlich $75s$. Somit ergibt sich eine Gesamtzeit von $95s$, die unser Roboter benötigt.

Gemessen wurde mit einer Android Stoppuhr-App und der Stoppuhr-Funktion einer digitalen Armbanduhr.

Chapter 3

Entwurf Software

3.1 Design



Die Software besteht aus einem Main-Loop, der das Herzstück der Anwendung bildet, sowie separaten Threads für das Auslesen der Sensoren, sowie die Steuerung der Motoren. Alle Komponenten der Software laufen im gleichen Prozess. Die Anwendung ist komplett im Userspace realisiert.

Im Main-Loop laufen die Daten aller Sensoren zusammen. Diese werden ausgewertet und eine adäquate Reaktion anhand aller relevanten Sensordaten errechnet. Anschließend wird das entsprechende Kommando an die Steuerthreads der Motoren weitergegeben.

Alle Sensoren — mit Ausnahme der Infrarot-Sensoren — verfügen über eigene Threads, die für das Auslesen und Aufbereiten der jeweiligen Sensordaten verantwortlich sind. Bei den Infrarot-Sensoren wurde auf diesen Thread verzichtet, da die Sensoren sehr schnell ausgelesen werden können und die Sensordaten keiner komplizierten Aufbereitung bedürfen. Daher ist der durch einen Thread entstehende Overhead hier nicht zu rechtfertigen. Der Zugriff auf die Sensoren erfolgt daher bei diesem Sensor auf einen direkten GPIO-Zugriff des Main-Loops.

Die Kommunikation zwischen den Threads erfolgt über einen geteilten Speicherbereich. In diesem wird nach einer erfolgreichen Messung der gemessene Wert abgelegt, sodass der Main-Loop bei Bedarf nur noch darauf zugreifen muss. Im Falle des Ultraschall-Sensors ist dieser Wert die Entfernung in Millimeter, im Falle des RFID-Readers die gelesene ID. Zur Steuerung der Motoren legt der Main-Loop einen Geschwindigkeitswert zwischen +100 und -100 in einem vorzeichenbehafteten Integerwert ab.

Im Kapitel 3.4 wird weiter auf die einzelnen Threads eingegangen.

3.2 System

3.2.1 OS

Das Projekt nutzt die Arch Linux ARM Distribution. Diese ist wiederum ein Fork von Arch Linux, welches nur für Desktop-Prozessoren ausgelegt ist.

Bei Arch Linux handelt es sich um eine Linux Distribution, die sich an Fortgeschrittene Linux Nutzer richtet und diesen das System selbst zusammen stellen lässt. Somit können wir auf einfachem Weg erreichen, dass das System auf unsere Bedürfnisse zugeschnitten ist, da nur Anwendungen installiert sind, die wir benötigen. Normale Distributionen liefern hingegen ein komplettes Softwarepaket und sind darauf ausgelegt, dass Anfänger von Linux die Distribution installieren und, ohne weitere Einstellungen vorzunehmen und Anwendungen zu installieren, verwenden können. Arch Linux hingegen muss man von Hand konfigurieren und wie oben schon beschrieben die Anwendungen die man benötigt selbst installieren.

Dienste

Folgende Dienste sind aktiv:

- Netzwerk
  - *systemd_networkd*: Netzwerkkonfiguration und DHCP Client
  - *wpa_supplicant*: WLAN Authentifizierung (Passwort)
  - *bt-pan*: Bluetooth Netzwerk Anbindung
  - *dhcpd*: DHCP Server für IP Vergabe für Bluetooth Clients
- *ntpd*: Zeitsynchronisation
- *opensshd*: SSH-Login

Alle anderen Dienste sind deaktiviert.

Anpassungen am Kernel

Da Arch Linux einen nicht realzeitfähigen Kernel nutzt, wurde dieser durch einen Kernel in der Version 4.9.30 mit Realtime-Patch ausgetauscht. Der Patch ersetzt die meisten Kernel Spinlocks durch Mutexe, die Prioritätenvererbung unterstützen und macht den Kernel dadurch realzeitfähig.

3.2.2 Remote Login

Für den Remote Login wurde *openssh* installiert und der *ssh*-Daemon aktiviert.

3.2.3 Netzwerkanbindung

Bluetooth

Um eine Drahtlose Verbindung unabhängig von der Verfügbarkeit eines WiFi AccessPoints zu gewährleisten haben wir ein Peer-to-Peer-Netzwerk über Bluetooth eingerichtet.

Hierfür wurde auf dem Raspberry Pi die Treiber für das Bluetooth Modul installiert und dieses aktiviert. Es wurden anschließend alle möglichen Clients einmalig verbunden und als vertrauenswürdig eingestuft.

Um Bluetooth für ein Netzwerk nutzen zu können muss ein *personal area network* (PAN) eingerichtet werden. Dies lässt sich automatisch nach dem Verbindungsaufbau durch *bt-pan*[1] erledigen.

Zusätzlich wurde ein *DHCP*-Server installiert und aktiviert um keine manuelle IP Konfiguration vornehmen zu müssen.

[1] https://github.com/mk-fg/fgtk/blob/master/bt-pan

WLAN

Da es teilweise Verbindungs- und Durchsatzprobleme mit Bluetooth gab haben wir eine alternative WLAN-Verbindung mit dem Labor Router eingerichtet.

Ethernet

Da Bluetooth und auch WLAN teilweise Probleme hatte haben wir eine statische IP am Ethernet Port konfiguriert, um auch bei Problemen mit diesen den Raspberry Pi noch warten zu können.

3.2.4 Probleme

Zeit / NTP

Nach dem Starten des Raspberry Pi ist das Datum des Systems zurückgesetzt. Dies führt u. a. zu SSL-Fehlern da teilweise Zertifikate noch nicht gültig sind.

Erster Lösungsansatz hierfür war das Installieren und aktivieren des *NTP*-Daemons. Damit wurde das Problem zwar gelöst, allerdings nur nach etwas längerer Zeit da die Synchronisation nicht sofort stattfindet.

Wir haben zusätzlich ein Skript erstellt, was die Synchronisation manuell anstößt, falls wir sofort ein korrektes Datum benötigen.

3.3 Programmiersprachen

Bei unserer Software kommt sowohl die Programmiersprache C++ als auch Rust zum Einsatz. Die Wahl fiel auf diese beiden, da sie keine Garbage-Collection besitzen, hardwarenah einsetzbar sind und sie leichter verwendbar sind als C.

3.3.1 Rust/C++ Anbindung

Unser Hauptroutine wurde in C++ entwickelt, deshalb musste eine Anbindung des Rust Codes nach C++ erstellt werden. Hierfür wurden in Rust C-Funktionen exportiert welche in C++ in Wrapper-Klassen gepackt wurden um die Vorteile der Objektorientierung beibehalten zu können.
Rust C-Funktionen: *kawaii/kawaii-rs/src/emergency_stop.rs*, *kawaii/kawaii-rs/src/ultrasonic_irq.rs*
C++ Wrapper Klassen: *kawaii/emergency_stop.cpp*, *kawaii/ultrasound_sensor.cpp*

Probleme

Bei der Anbindung von Rust über C Funktionen stellte das Nutzen von komplexen Typen ein Problem dar, da die Rust Dokumentation darauf nur

ungenügend eingeht. Nach längerer Recherche konnten wir einen Artikel der sich mit diesem Thema beschäftigt finden: *Complex types with Rust's FFI*[2]

3.4 Threads

Sämtliche Ansteuerungen für die Sensoren, bis auf die der Infrarot-Sensoren, sind im Projekt über Threads realisiert. Der Datenaustausch zwischen dem Main-Thread und den Ansteuerungs-Threads erfolgt über shared memory. Der Zugriff auf den gemeinsamen Speicherbereich wird mittels atomic-Variablen synchronisiert. Im Folgenden soll nun auf die Threads eingegangen werden.

3.4.1 Main-Thread

Main steht an vierter Position der Prioritäten und übernimmt neben der Auswertung der Sensordaten die Ansteuerung der Infrarot-Sensoren. Wenn an diesen eine Eins anliegt wurde ein schwarzer Bereich detektiert, ansonsten liefern diese null zurück.
Implementierung: *kawaii/main.cpp*

3.4.2 PWM-Signal der Motoren

Für die beiden Motoren existiert jeweils ein Thread. Diese beiden Threads sind in der Priorität an zweiter Stelle. Das PWM-Signal schält in einem bestimmten Intervall die Motoren an und aus, um die Geschwindigkeit des Motors zu regulieren.
Implementierung: *kawaii/engine.cpp*

3.4.3 Ultraschall-Sensor

Bei den beiden Ultraschall-Sensoren kommen für Echo und Trigger jeweils zwei Threads zum Einsatz. Der Trigger-Thread zieht alle $20ms$ den Trigger-Output für $20\mu s$ auf 1. Der Echo-Thread wartet entsprechend auf einen Interrupt und beginnt bei steigender Flanke mit der Zeitmessung. Kommt nun eine fallende Flanke, stoppt dieser Thread die Zeitmessung und berechnet dem entsprechend den Abstand. Die maximale Frequenz für den Trigger von $20ms$ und die minimale Triggerlänge von $20\mu s$ kommen bedingt durch die Hardware zustande. Der Ultraschall-Echo-Thread ist in der Prioritätenliste an dritter Stelle, der Ultraschall-Trigger-Thread an fünfter.
Implementierung: *kawaii/kawaii-rs/dependencies/ultrasonic-irq/src/lib.rs*

[2]https://medium.com/jim-fleming/complex-types-with-rust-s-ffi-315d14619479

3.4.4 RFID

Das Lesen beim RFID-Reader erfolgt periodisch und über einen eigenen Thread. Dabei wird in einem Intervall von $50ms$ abgefragt, ob ein RFID-Chip vorhanden ist. Wenn eine Karte mit RFID-Chip vorhanden ist, wird die entsprechende UID gespeichert.
Implementierung: *kawaii/rfid_reader.cpp*

3.5 Notaus-Button

Der Notaus-Button wird mittels atomic-Variable gesteuert. Ist diese durch drücken des Buttons gesetzt, führt der Main-Thread die entsprechenden Optionen durch und hält den Roboter an.
Implementierung: *kawaii/kawaii-rs/dependencies/emergency-stop/src/lib.rs*

3.6 Verteilung der Prioritäten

Bei der Verteilung der Prioritäten wurden die Intervalle sowie die Wichtigkeit der einzelnen Komponenten betrachtet, daraus ergab sich für uns die folgende Prioritäten-liste.

3.6.1 Notaus

Der Notaus besitzt die höchste Priorität, sodass seine Funktionalität immer zeitnah gewährleistet ist.

3.6.2 PWM-Signal

Da das PWM-Signal eine hohe Frequenz besitzt (kurze Deadlines) bekam es die Priorität zwei.

3.6.3 Ultraschall Echo

Beim Ultraschall Echo wurde die Priorität auf drei gesetzt, damit die Zeit des Ultraschalls und somit indirekt die Abstände möglichst genau gemessen werden können.

3.6.4 Main-Thread

Der Main-Thread steht an vierter Steller der Prioritäten. Dieser ist die wichtigste Komponente, jedoch nicht so zeitkritisch wie die höher Prioren Threads.

3.6.5 Ultraschall Trigger

Die fünfte Position in der Prioritätenliste übernahm der Ultraschall Trigger. Dieser ist nicht sehr zeitkritisch und hat ein relativ niedriges Intervall.

3.6.6 RFID

An letzter Stelle steht der RFID Reader, dieser hat das höchste Intervall und stellt nur eine relativ unwichtige Funktionalität zur Verfügung.

3.7 RFID-Sensor-Library

Für die Ansteuerung des RFID-Sensors wurde C++-Quellcode vom Github-Respository https://github.com/paguz/RPi-RFID in eine eigene C++-Klasse eingebettet. Das Repository verwendet die bcm2835-Library.

Chapter 4

Realzeitnachweis

4.1 Realzeitanforderungen

4.1.1 Physikalische Eigenschaften

Um die Anforderungen zu bestimmen haben wir die physikalischen Eigenschaften unseres Roboters bestimmt.

Hierbei ist die Höchstgeschwindigkeit von Interesse: Laut Messungen fährt der Roboter $2,01m$ in 5 Sekunden.

$$v = 2,01m/5s = 0,402m/s$$

Daraus ergibt sich eine Höchstgeschwindigkeit von $0,402m/s$.

4.1.2 Ultraschall

Bei der Ultraschall Messung wird ab $18cm$ gedreht, der Mindestabstand für das Wenden beträgt $10cm$:

$$t_{D_{max}-Ultraschall} = \frac{18cm - 10cm}{0,402m/s} = 199ms$$

Folglich liegt die Reaktionszeit für das Erkennen und Anhalten mit Ultraschall bei $199ms$. Hardwarebedingt lassen sich Entfernungsmessungen nur alle $20ms$ durchführen:

$$t_{P_{min}-Ultraschall} = 20ms$$

4.1.3 Infrarot

Die Breite der Linien beträgt 1,5cm:

$$t_{D_{max}-Infrarot} = \frac{1,5cm}{0,402m/s} = 37,3ms$$

Daraus folgt eine maximale Reaktionszeit von $37,3ms$ für das Erkennen der Linien. Aufgrund von physikalischen und hardwareseitigen Einschränkungen kann das Anhalten häufig nicht innerhalb Linie erfolgen. Die Gründe liegen bei der Massenträgheit, der schlechten Motoren und unzureichender Bodenhaftung.

Deshalb haben wir uns dazu entschieden ein Überfahren der Linie in Kauf zu nehmen, sofern diese zuverlässig erkannt wird und wir zurück fahren.

4.1.4 RFID

Die minimale Länge eines RFID-Chips beträgt $2,5cm$ und Länger der Messfläche beträgt ca. $4cm$. Folglich ist eine Messung möglich, während sich die $4cm$-lange Messfläche über dem Chip befindet.

$$t_{D_{max}-RFID} = \frac{4cm}{0,402m/s} = 99,5ms$$

4.1.5 Motor

Für die Motoren haben wir eine Periode von $500\mu s$ festgelegt.

4.2 Reaktionszeit

4.2.1 Main / Infrarot

$$t_{E_{max}} = 1,4ms$$

$$t_{E_{max}} \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq t_{D_{max}} - t_{E_{max}}$$

$$1,4ms \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 37,3ms - 1,4ms$$

$$1,4ms \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 32,9ms$$

Aus der maximalen Reaktionszeit und der maximalen Ausführungszeit ergibt sich eine Periode zwischen $1,4ms$ und $32,9ms$. Wir haben uns für $t_{P_{min}} = t_{P_{max}} = 10ms$ entschieden.

4.2.2 RFID

$$t_{E_{max}} = 2,7ms$$

$$t_{E_{max}} \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq t_{D_{max}} - t_{P_{max-Main}} - t_{E_{max-RFID}}$$

$$2,7ms \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 99,5ms - 32,9ms - 2,7ms$$

$$2,7ms \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 63,9ms$$

Wir haben uns für $t_{P_{min}} = t_{P_{max}} = 50ms$ entschieden.

4.2.3 Engine

$$t_{E_{max}} = 5\mu s$$

$$5\mu s \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}}$$

$$5\mu s \leq 500\mu s \leq 500\mu s \quad \square$$

4.2.4 Ultrasonic Echo

$$t_{E_{max}} = 200\mu s$$

$$t_{E_{max}} \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq t_{D_{max}} - t_{P_{max-Main}} - t_{P_{max-Engine}} - t_{E_{max-U.-Echo}}$$

$$200\mu s \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 199ms - 32,9ms - 0,5ms - 0,2ms$$

$$200\mu s \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 165,4ms$$

$$200\mu s \leq 20ms \leq 20ms \leq 165,4ms \quad \square$$

4.2.5 Ultrasonic Trigger

$$t_{E_{max}} = 88\mu s \approx 0,1ms$$

$$t_{E_{max}} \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq t_{D_{max}} - t_{P_{max-Main}} - t_{P_{max-Engine}} - t_{E_{max-U.-Trigger}}$$

$$200\mu s \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 199ms - 32,9ms - 0,5ms - 0,1ms$$

$$200\mu s \leq t_{P_{min}} \leq t_{P_{max}} \leq 165,5ms$$

$$200\mu s \leq 20ms \leq 20ms \leq 165,5ms \quad \square$$

4.2.6 Emergency Stop

$$t_{E_{max}} = 1ms$$

4.3 Blokierzeiten

4.3.1 Atomic Integer / Bool

$$t_B = 0,26\mu s$$

4.4 Nachweis

4.4.1 Prioritäten

1. Emergency Stop
2. 2x Engine
3. 2x Ultrasonic Echo
4. Main
5. 2x Ultrasonic Trigger
6. RFID

4.4.2 Temporalen Parameter

- Main: $(10.000\mu s;\ 1.400\mu s)$
- RFID: $(50.000\mu s;\ 2.700\mu s)$
- 2x Engine: $(500\mu s;\ 5\mu s)$
- 2x Ultrasonic Echo: $(20.000\mu s;\ 200\mu s)$
- 2x Ultrasonic Trigger: $(20.000\mu s;\ 88\mu s)$
- Emergency Stop: $(-;\ 50\mu s;\ 1.000\mu s)$
- Atomic Integer / Bool: $t_B = 0,26\mu s$

4.4.3 Nachweis ohne Berücksichtigung der Ressourcen

Hinreichender Schedulingtest

8 Tasks: $u \approx 70\%$ Auslastungsgrenze

- Main: $1.800\mu s/10.000\mu s = 18\%$
- RFID: $2.700\mu s/50.000\mu s = 5,4\%$
- 2x Engine: $5\mu s/500\mu s = 0,1\%$
- 2x Ultrasonic Echo: $100\mu s/20.000\mu s \approx 0,1\%$
- 2x Ultrasonic Trigger: $110\mu s/20.000\mu s \approx 0,1\%$

$$14\% + 5,4\% + 6 * 0,1\% = 24\%$$
$$24\% < 70\% \quad \square$$

4.4.4 Nachweis mit Berücksichtigung der Ressourcen

Blockierzeiten

- Main: $t_B = 7 * t_{B_{AtomicInteger/Bool}} = 1,82\mu s$
- RFID: $t_B = 1 * t_{B_{AtomicInteger/Bool}} = 0,26\mu s$
- 2x Engine: $t_B = 1 * t_{B_{AtomicInteger/Bool}} = 0,26\mu s$
- 2x Ultrasonic Echo: $t_B = 1 * t_{B_{AtomicInteger/Bool}} = 0,26\mu s$
- 2x Ultrasonic Trigger: $t_B = 1 * t_{B_{AtomicInteger/Bool}} = 0,26\mu s$

Hinreichender Schedulingtest

- Main: $1.801,82\mu s/10.000\mu s \approx 18,02\%$
- RFID: $2.700,26\mu s/50.000\mu s \approx 5,4\%$
- 2x Engine: $5,26\mu s/500\mu s \approx 0,11\%$
- 2x Ultrasonic Echo: $100,26\mu s/20.000\mu s \approx 0,1\%$
- 2x Ultrasonic Trigger: $110,26\mu s/20.000\mu s \approx 0,1\%$

$$14,02\% + 5,4\% + 2 * 0,11\% + 4 * 0,1\% = 24,03\%$$
$$24,03\% < 70\% \quad \square$$