

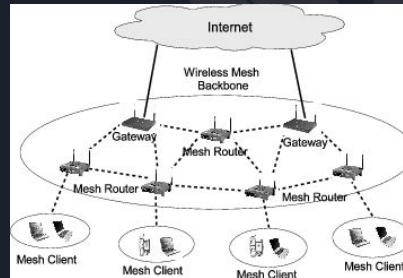
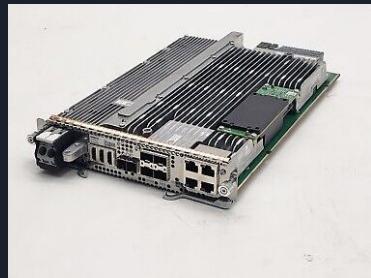


Embedded Linux: Wprowadzenie

Karol
Przybylski

\$ whoami

Senior Software Engineer @ consult.red
Tech: Embedded Linux, Bash, C, C++



linuxdev





Uczestnicy

Czym się zajmuję?

Jaki jest dla mnie cel szkolenia?

Co aktualnie wiem o temacie szkolenia?

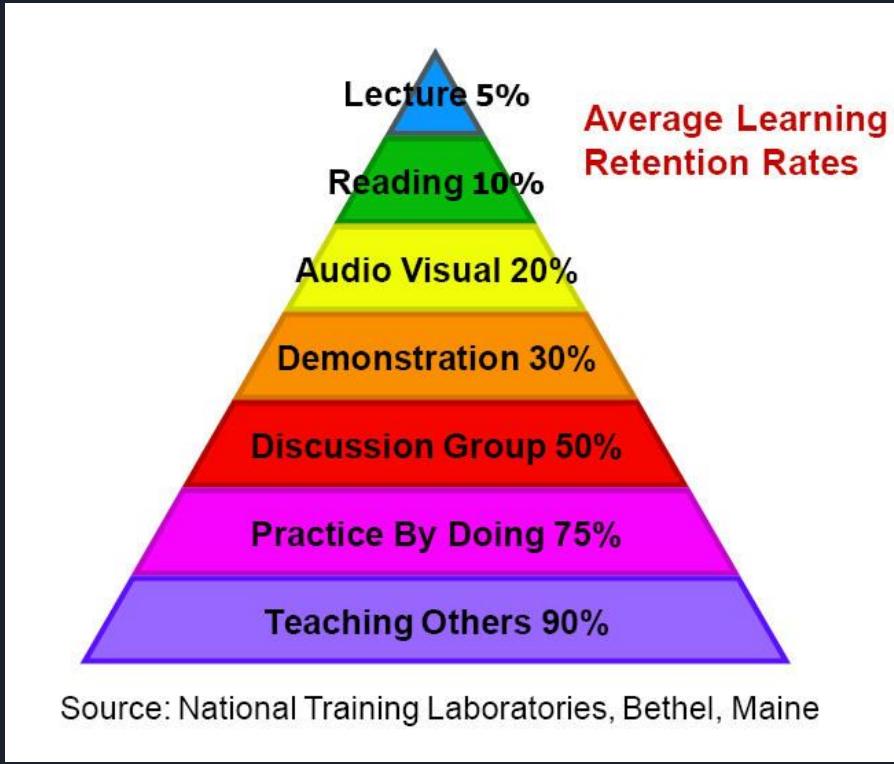
Informacje organizacyjne

Godziny: 9-16

Przerwa 1: ~10.30

Obiad: ?

Przerwa 2: ?





Agenda

01 Podstawy Linuxa Embedded - Toolchain, Bootloader, Kernel, Rootfs filesystem

02 Pisanie własnych recept i modyfikacja Buildroota, obsługa sprzętu

03 Optymalizacja, debugowanie, najlepsze praktyki i security



Droga developera

OD

Znam podstawy Linuxa, ale nie czuję się pewnie z tworzeniem obrazów Linuxa Embedded

DO

Potrafię zbudować obraz dystrybucji z Buildrootem

Umiem skonfigurować 4 kluczowe elementy - toolchain, bootloader, kernel i rootfs

Wiem jak rozwijać i integrować aplikacje za pomocą Buildroota



Na zakończenie szkolenia





Sprawdzenie HW/SW



Sprawdzenie środowiska - HW

- Raspberry Pi 4b
- Zasilacz
- Karta SD
- Konwerter USB-Serial
- Kabel HDMI
- Kabel ETH

Dodatkowo:

- Monitor
- LEDy
- Kableki, płytka stykowa
- BMP280



Raspberry Pi 4b

<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Q: Dlaczego nie każde RPi nadaje się do zastosowań przemysłowych?



Sprawdzenie środowiska - SW

Linux

IDE (e.g. VS Code)

Terminal (e.g. terminator)

Program do obserwowania seriala
(picocom)

Text editor (jakikolwiek)



Środowisko developerskie

Problemy:

Mnóstwo zależności

Niejednolite środowisko

Możliwości modyfikacji



Maksymalnie prosty

Dostęp do plików na hoście



Ćwiczenie

Repozytorium:

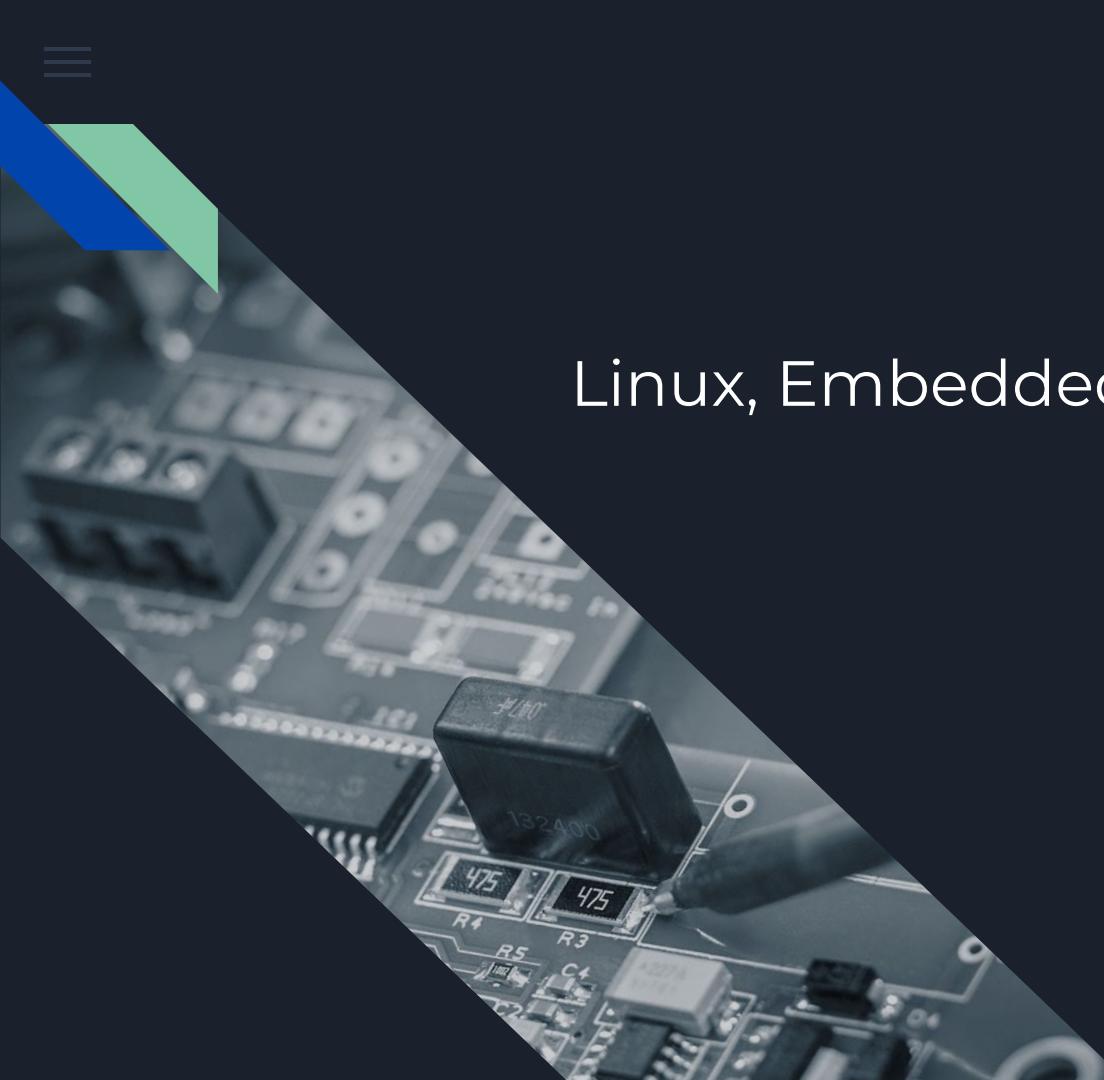
<https://github.com/KarolPWr/builder-intro/tree/master>

Branch: master

Discord:

<https://discord.gg/hY5pQK5d>

Praca w kontenerze



☰

Linux, Embedded Linux, RTOS...



Systematyka

“Linux” - linux kernel + distro

GNU/Linux - system operacyjny, kernel + narzędzia GNU (tar, gcc, text editor etc.)

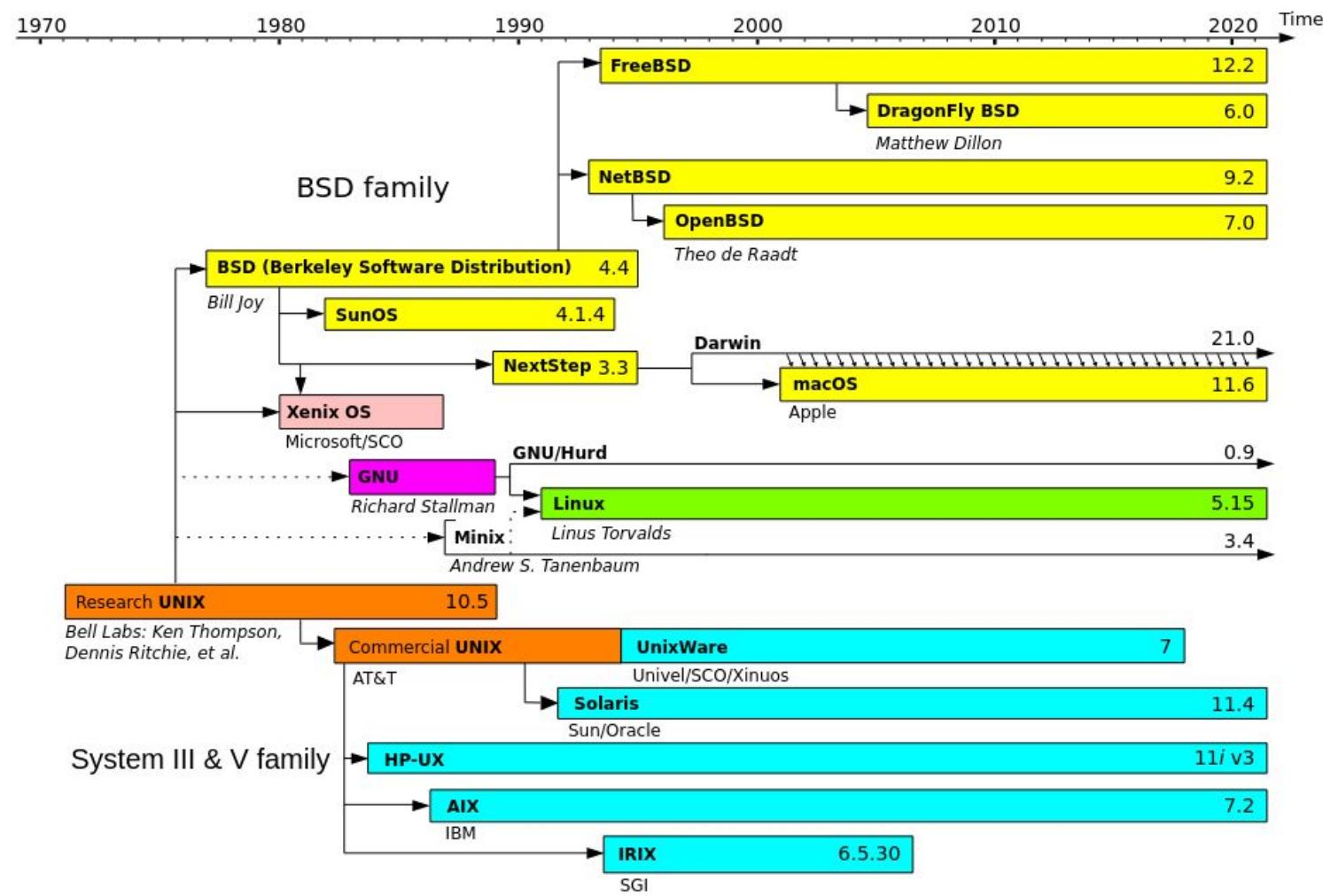
Embedded Linux - linux kernel + wyspecjalizowane distro

QNX - komercyjny, RTOS, microkernel

Wind River

Unix-like - “parasol”







Sat 02/27 20:43:46 FPS:29 Mem:0015989000 CPU24 1 1 1 1 1 1 1
[Copy this file to your /Home directory and modify it. This version is the default.]
C:\Dir:l
E:\Dir:l
E:\("::Demo");Dir:l
E:\("::Demo/Graphics");Dir:l
E:\("::Demo/Icons");Dir:l
E:\("::Demo/Games");Dir:l
E:\("::Demo/Multicore");Dir:l
E:\("::Demo/Hsm");Dir:l
E:\("::Doc");Dir:l
E:\("::DemoLectures");Dir:l
E:\("::Helps");Dir:l

Run **TOSstdIn()** if you wish to use the official staff /Home files.
C:\("::Demo/AuctExample");Dir:l

Make all with **RootHDIns()**.
E:\("::Kernel");Dir:l
E:\("::Compiler");Dir:l

The ::StartOS.HC file is compiled every time you boot.
C:\("::Home");Dir:l

Welcome Help & Index Demo Index
FastReboot Take Tour Key Map

Public Domain Operating System
Help & Index, Quick Start: Cmd line
Directory of D:\Home
FILE TIME S
02/27 20:37 8888 +
02/27 20:37 8888 +
06/21 11:1 MENU **Le...** AutoCompile [640x160]
01/10 23:1 WordTour
02/27 20:37 F01 TourPut
D:\Home>F02 Tour
F03 Tour
F04 TourMenu
F05 TourPutTask
F06 Tours
F07 Tour
F08 Tourago
F09 Tourbillion
F10 Tourist
F11 Tourmaline
F12 Tourn
F13 Tournament
F14 Turnery
F15 Tourniquet

Fun Games
Titanium Black Diamond Flap Bat UavDom
FlatTops Bomber Golf Keepaway RawHide
More-TB Line:0030 Col:0021

Dlaczego NIE Linux?

Linux potrzebuje sporo zasobów (m.in. 32 bitowy procesor, pamięć)

RTOS

Certyfikacja (medyczne, automotive itp.)

Diagram: Cortex-M vs Cortex-A



Dlaczego Linux?

Wsparcie HW 'od strzała'

USB, BT, Network Stack

Wsparcie dla wielu architektur [arch](#)

Modularność

Open source, społeczność

Niezależność od vendora



Cztery elementy Linuxa Embedded

Toolchain

Bootloader

Kernel

Root filesystem



Bogdan Botezatu
@bbotezatu



Happy 25th birthday, #Linux! Here's your f-ing #cake, go ahead and compile it yourself.



Build systems



yocto
PROJECT

BuildRoot
Making Embedded Linux Easy

OpenWrt
WIRELESS FREEDOM



Co trzeba zrobić?

- Konfiguracja Toolchaina
- Konfiguracja i budowanie rootfs
- Konfiguracja i komplikacja kernela
- Konfiguracja i komplikacja bootloadera
- Integracja tego wszystkiego (**najtrudniejsze!**)
- Stworzenie powtarzalnego środowiska
- I wszystko inne



Ręczne budowanie (Roll Your Own, [LFS](#))

- Pełna kontrola
- Dopasowanie pod siebie

Ale:

- Bardzo skomplikowane, dependency hell
- Brak zewnętrznego supportu (nawet od community)
- Wymyślanie koła na nowo

Build systemy

OpenWRT

Mały, bazuje na
Buildrootie - dla urządzeń
sieciowych

Buildroot

Dobry dla małych i
średnich produktów

Yocto

Behemot, dobry dla linii
produktów i
skomplikowanych
systemów

	Pros	Highly modular, flexible, well documented	Complex for beginners	Cons
	Pros	Lightweight, easy to learn	Limited customization options	Cons
	Pros	Excellent for networking devices	Rigid policies, less customization	Cons

https://pages.ubuntu.com/rs/066-EOV-335/images/Ubuntu_Core_4_pager_DS_revised_may_2024.pdf?version=0

Obrazek: <https://tuxcare.com/blog/which-linux-distro-is-best-for-embedded-development/>



Buildroot

- + Łatwiejszy niż Yocto
- + Daje spore możliwości
- + Znakomity do nauki Linuxa
- + Dokumentacja
- Dzielenie się kodem w dużych teamach
- Brak package managera (update SW)
- Mniej funkcjonalny, gorszy cache

Częsta ścieżka: początek pracy na Buildroot -> produkt/firma rośnie, dodatkowe modele, przejście na Yocto



Buildroot z lotu ptaka

- + Konfiguracja - menuconfig
- + Szybki (*) - dla prostych buildów
- + Napisany w make i bash
- + Generuje małe obrazy, kilka MB
- + 3000+ gotowych paczek do integracji
- + Wspiera wiele architektur
- + Wsparcie społeczności, lista mailowa



Release management

- Stabilne wersje co 3 miesiące:
 - YYYY.02, YYYY.05, YYYY.08, YYYY.11
- Dościągnięcia jako .tar i z repozytorium githuba
- Wydanie LTS co roku

Dokumentacja: <https://buildroot.org/docs.html>

Oficjalna strona: <https://buildroot.org/>

Git: <https://gitlab.com/buildroot.org/buildroot>

Lista mailowa: <https://lore.kernel.org/buildroot/>



Ćwiczenie

2_buildroot_podstawy

Pierwszy krok



Cztery elementy Linuxa Embedded

Toolchain

Bootloader

Kernel

Root filesystem



Toolchain



Budowanie systemu z użyciem crosstool-NG



Proces kompilacji

Preprocesor -> Kompilator -> Assembler -> Linker = plik wykonywalny



Toolchain

Zawiera:

- Binutils (assembler, linker etc.)
- GCC (GNU Compiler Collection)
- C library (glibc, musl, ulibc)
- Kernel headers
(`/usr/src/linux-headers-6.8.0-94/include/`)
- GDB



Co mamy do wyboru

Rozwiązania od vendora, np. Broadcom

Generowany przez build system np. Yocto, Buildroot

Paczka z dystrybucji desktop Linuxa (distribution toolchain)

Rozwiązania open source np. crosstool-ng



Czy jest skonfigurowany tak jak chcemy?

Czy będzie aktualizowany?

Czy posiada zadowalające wsparcie?

Ile potrzebujemy kontroli?

Crosstool-NG: <https://github.com/crosstool-ng/crosstool-ng>



Co robi C library?

Implementacja standardowych funkcji języka (np. Printf z stdio.h)

Razem z kernel headers daje nam dostęp do funkcji kernela (open, write etc.)

Każdy nasz program będzie z nią linkowany

Wybór C library

uClibc-ng

Mały rozmiar - gdy mamy
mało zasobów

glibc

“Stare, dobre”
Spore community i
wsparcie
bloat

musl

“Lepsze” glibc
Mniejszy bloat
Dziwne błędy,
kompatybilność z
programami



Toolchain w Buildroocie

Mamy dwie opcje do wyboru:

- Internal toolchain
- External toolchain

Internal vs external

Internal

- +Dobrze zintegrowany
- +Buduje tylko co trzeba
- Kosztowny rebuild

External

- +Więcej kontroli
- +Szybsze rebuildy
- Nasza odpowiedzialność



crosstool-ng

<https://github.com/crosstool-ng/crosstool-ng?tab=readme-ov-file>

- + Jak poznać czy projekt ma perspektywy (commity, dokumentacja, społeczność)

Introduction:

<https://crosstool-ng.github.io/docs/introduction/>



Ćwiczenie

Konfiguracja toolchaina:

[3_toolchain.md](#)



Optymalizacja



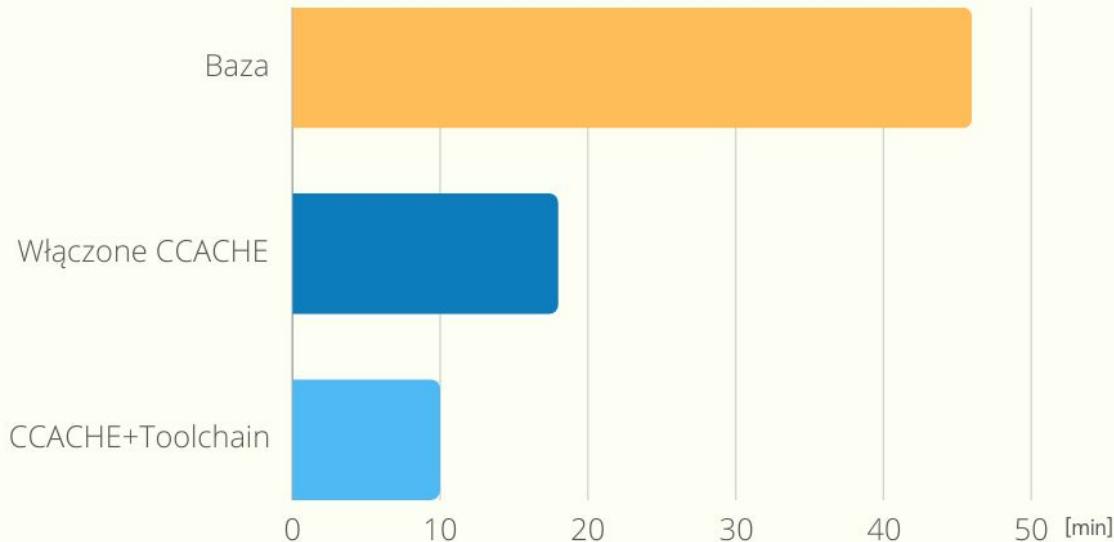


Jak znacznie zmniejszyć build time?

- Pre-built toolchain
- CCACHE
- Wiedza kiedy trzeba przebudować projekt
- Szybki dysk i dużo RAM
- **Nie korzystanie z NFS**

Lista kiedy należy budować: <https://buildroot.org/downloads/manual/manual.html#full-rebuild>

Optymalizacja budowania: 46 → 9 minut





Ćwiczenie

Optymalizacja i pierwszy build

Build - ok 40 min

Instalacja połączenia szeregowego

Cel: umożliwienie komunikacji z płytka

Po stronie hosta:

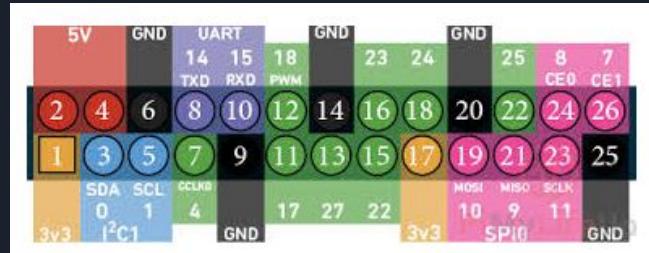
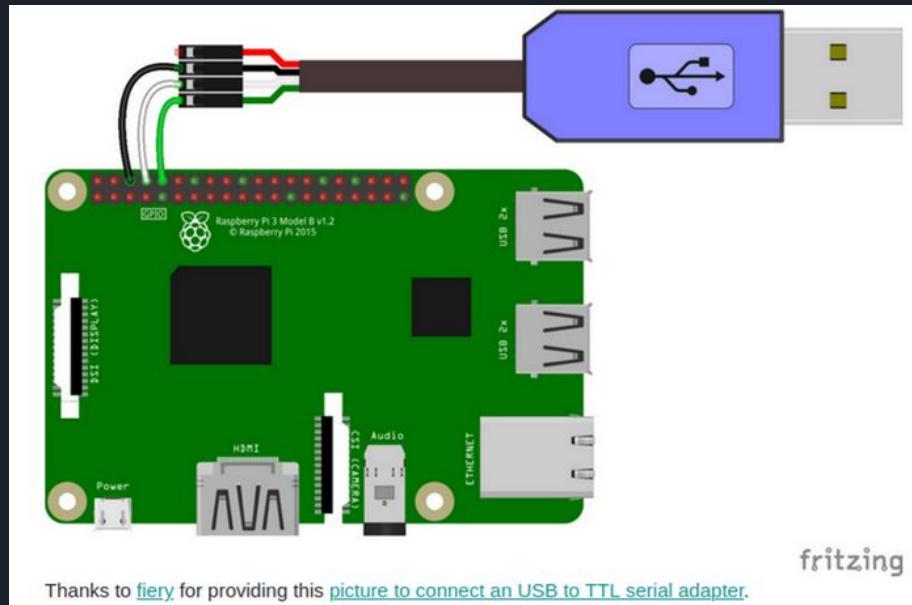
Wpięć konwerter do gniazda USB

```
$ dmesg | tail
```

```
$ picocom -b 115200 /dev/ttyUSBX
```

UWAGA1: Zworka żółta na 3.3V

UWAGA2: Tx na zmianę z Rx (przemiennie)



<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>



Crosstool - podsumowanie

\$ ct-ng - frontend do toolchaina

\$ ct-ng menuconfig

\$ ct-ng show-config

\$ folder 'x-tools' - lokalizacja wyprodukowanych binarek

Toolchain możemy również używać poza buildrootem.



Boot process

Zasilanie ->

Magic!

-> System



Kroki

- 1 - ROM code
- 2 - SPL - Secondary Program Loader
- 3 - Główny bootloader (np. u-boot) - ładujemy kernel z devicetree
- 4 - Kernel
- 5 - Initramfs (opcjonalnie)
- 6 - Init manager (np. systemd)



ROM code

ROM i początkowy bootloader

Zasoby

Jeden rdzeń CPU
On chip memory

Misja

Zainicjalizować sprzęt
Załadować SPL do pamięci

Misje poboczne

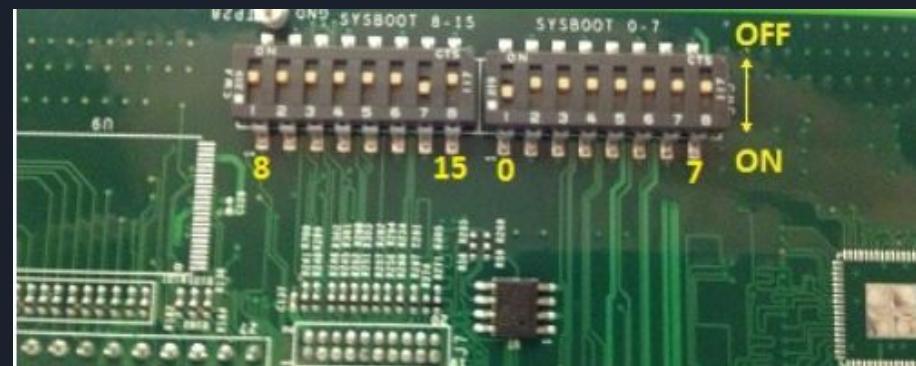
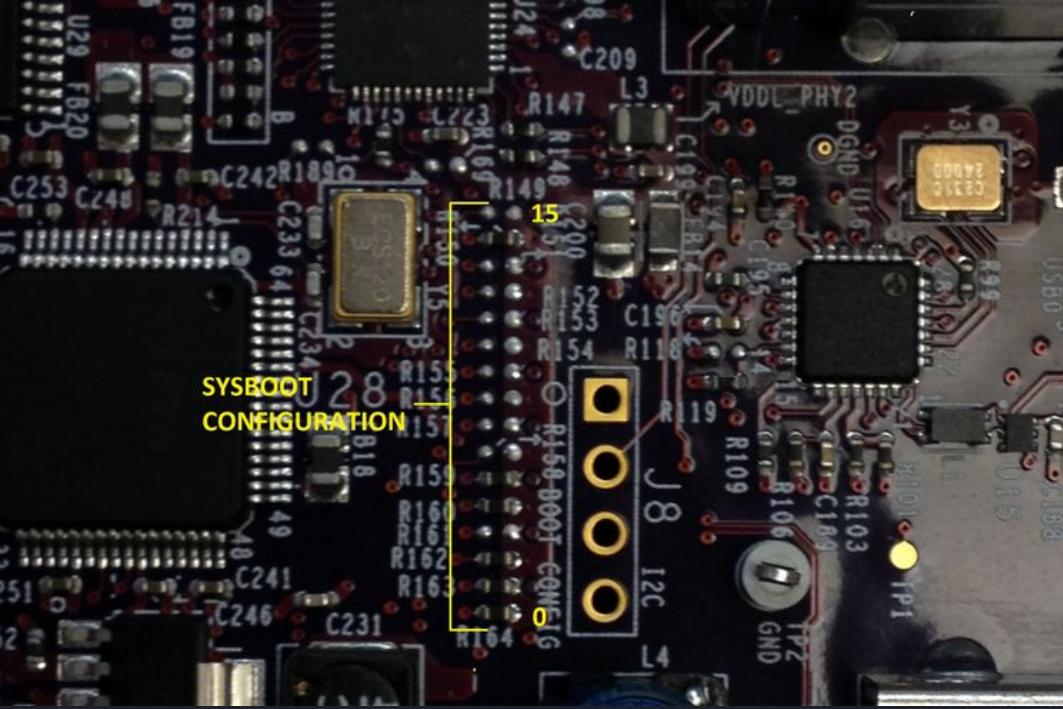
PLL
System Clock
Watchdog



Praktyka

<https://www.ti.com/lit/ug/spruh73q/spruh73q.pdf?ts=1696785774495>

26.1.6 Booting



Bootloader: Das U-boot





Bootloadery - SPL/TPL

Dostępne rozwiązania:

U-boot

Custom (od vendora)

Barebox - <https://github.com/barebox/barebox>

Sporo innych, ale najczęściej dwa pierwsze

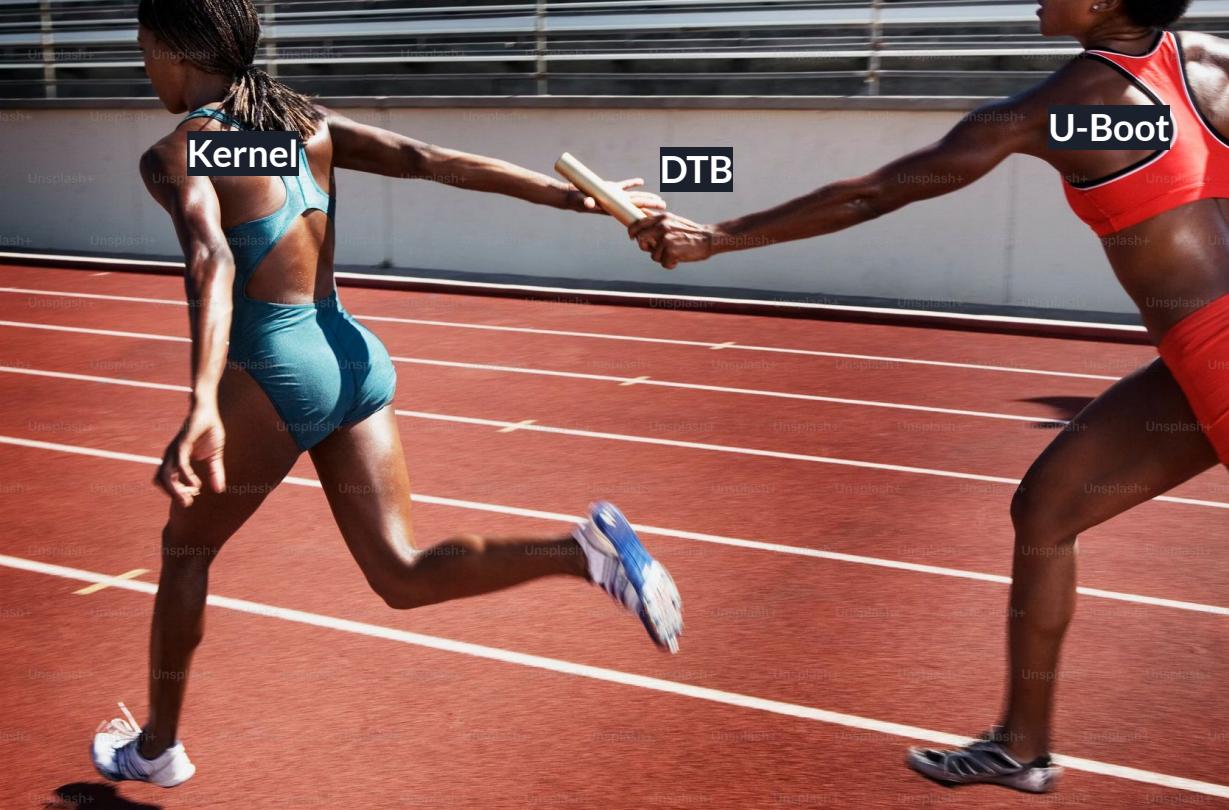


Wybieramy U-boot'a



"Though there are quite a few other bootloaders, 'Das U-Boot', the universal bootloader, is arguably the **richest, most flexible, and most actively developed** open source bootloader available."

Building Embedded Linux Systems, by Karim Yaghmour



Kernel

DTB

U-Boot



U-boot ciąg dalszy

Pełny program (mini-OS)

Udostępnia podstawowe możliwości:

Ustawianie zmiennych

Połączenie z siecią

Dostęp do pamięci



Zawartość u-boota

Źródła: buildroot/output/build/u-boot-*

Ciekawe rzeczy -

<https://github.com/u-boot/u-boot/blob/master/arch/arm/cpu/armv8/cpu.c#L37>

Plik wynikowy - u-boot.bin

Toole pomocnicze -

<https://github.com/u-boot/u-boot/tree/master/tools>



Firmware vendora

Dodatkowy krok inicjalizacji

Zazwyczaj closed source

Dla Raspberry Pi:

Start4.elf

output/images/rpi-firmware



Ćwiczenie

Konfiguracja u-boota

4_bootloader.md



Możliwości u-boota

Pełne zarządzanie bootem - ładowanie kernela, devicetree, ramdysku z różnych źródeł (SD, emmc, USB, NAND, SPI flash)

Uruchamianie różnych obrazów kernela - booti, bootz, bootm

Network boot - TFTP, PXE,

Debugowanie i diagnostyka - printenv, dumpowanie rejestrów HW

Testowanie peryferiów (SPI, usb, UART)

Secure boot

Diagnostyka

Odczyt rejestrów HW: <https://datasheets.raspberrypi.com/bcm2711/bcm2711-peripherals.pdf>

```
U-Boot> md 0xFE200000 10
```

Manipulacja GPIO:

```
U-Boot> gpio set 26
```

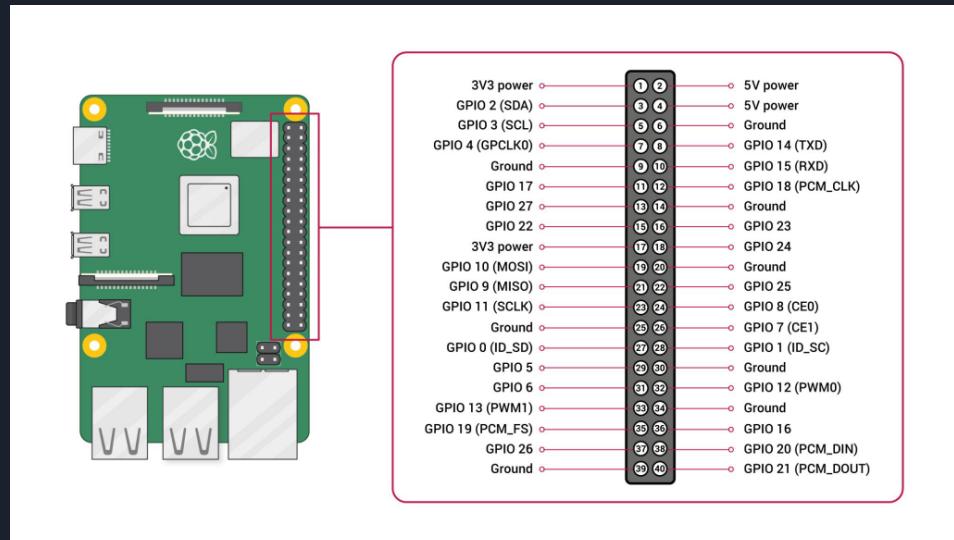
```
U-Boot> gpio clear 26
```

Wysyłanie znaków przez UART:

```
U-Boot> mw 0xFE201000 0x41 1
```

Listowanie network devices:

```
U-Boot> net list
```





Możliwości u-boota

\$ printenv

\$ mmc rescan

\$ setenv ipaddr 192.168.159.42

Definicja nowych zmiennych i komend



Własne zmiany w buildroot - automatyzacja

3 sposoby na modyfikacje obrazu:

- Zmiana konfiguracji (pliki ***config**)
- Skrypty **post-*** (post-build.sh, post-image.sh)
- Rootfs **overlay** (o nich później)



Skrypty post-* (w boards/)

post-build.sh - “run before building the filesystem image”

post-image.sh - “specific actions after all images have been created”

Np. transport rootfs na serwer tftpboot, lista plików na kartę SD

Można dodawać własne skrypty post-image (w menu *System configuration*)

Przykłady - inne definicje płytek:

board/radxa/rock5b/post-build.sh

board/radxa/rockpi-n8/post-build.sh

board/raspberrypi/post-build.sh



Jak trackować swoje zmiany?

Dwa podejścia:

- Osobny branch od buildroota, nasze zmiany trzymamy w głównym drzewie
- Osobne repozytorium, trzymamy wszystko w osobnym folderze (tzw. BR2_EXTERNAL)

Zalety i wady?



Ćwiczenie

Automatyzacja kompilacji u-boota

[4a_bootloader_automat.md](#)



Kernel

1. a softer, usually edible part of a nut, seed, or fruit stone contained within its shell.
"the kernel of a walnut"
2. the central or most important part of something.
"this is the kernel of the argument"



Q: Co robi kernel?





Główne zadania kernela

Przy bootie:

- Inicjalizacja reszty HW na podstawie DT (devicetree)
- Inicjalizacja systemu
- Przekazanie pałeczki init managerowi, który robi resztę

W czasie pracy:

- Memory/resource management
- Scheduling
- HW management



Kernel przy boocie

Co jest przekazywane kernelowi?

- Podstawowe informacje o HW (n.p. Clock speed)
- Kernel command line (cmdline)

<https://www.kernel.org/doc/html/v4.14/admin-guide/kernel-parameters.html>

cmdline: console=serial0,115200 console=tty1 root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4

Co robi kernel przy inicio?

Ustawia wektory przerwań, sygnały, arch itp.

Na końcu, szuka programu ‘init’

```
kernel: Booting Linux on physical CPU 0x0
```



Kernel 2

Główny kod inicjalizacji:

<https://github.com/torvalds/linux/blob/master/init/main.c#L1005> - start_kernel

Związany z architekturą:

<https://github.com/torvalds/linux/blob/3006adf3be79cde4d14b1800b963b82b6e5572e0/arch/arm64/kernel/setup.c#L293>



Kernel w Buildroocie

Kilka możliwości konfiguracji:

- Latest
- Latest CIP SLTS (co to jest? `?` w menuconfig,
<https://www.cip-project.org/about/linux-kernel-core-packages>)
- Latest CIP RT SLTS
- **Custom version**
- Custom tarball
- Custom git/mercurial/subversion repo

Zalecana wersja: custom, by nie wiązać wersji Buildroota z wersją kernela (upgrade Buildroota nie równa się upgradowi kernela)

Konfiguracja

Kernel używa (jak BR) kconfig do konfiguracji

```
menu "Kernel"

config BR2_LINUX_KERNEL
    bool "Linux Kernel"
    select BR2_PACKAGE_HOST_KMOD # Unconditional, even if modules not enabled
    select BR2_PACKAGE_HOST_IMAGEMAGICK if BR2_LINUX_KERNEL_CUSTOM_LOGO_PATH != ""
    help
        Enable this option if you want to build a Linux kernel for
        your embedded device
```

BR nie potrafi skopiować wszystkich opcji do swojego menuconfiga -> inny sposób

Podobnie to działa w przypadku innych paczek używających kconfig (busybox, uboot etc)



Konfiguracja c.d.

3 możliwości konfiguracji:

- Gotowy defconfig (np. Dla raspberry pi)
- Customowy config (np. Na podstawie defconfiga)
- Defconfig dla danej architektury (np. arm64)

Powyższe konfiguracje można nadpisywać tzw. "Fragmentami"

Przykład 1: buildroot/configs/bananapi_m2_berry_defconfig (custom version)

Przykład 2 (custom config): chromebook_elm_defconfig (linux.config)

3: A jak to robi RPi? (custom tarball) <https://github.com/raspberrypi/linux>



Konfiguracja c.d.

Menu: `make linux-menuconfig`

Załaduje zdefiniowany defconfig albo nasz customowy plik

Zmiany widoczne tylko w `buildroot/build/linux-version` (`make clean` je usuwa)

Aby zapisać:

```
$ make linux-update-config (cały .config)
```

```
$ make linux-update-defconfig (tylko minimalny defconfig)
```

Działa tylko gdy używamy opcji “custom config file”



Ćwiczenie

Konfiguracja kernela

Rootfs





Co powinno być w środku?

- Init
- Shell
- Demony
- Shared libraries
- Pliki konfiguracyjne
- Device nodes
- proc/ i sys/



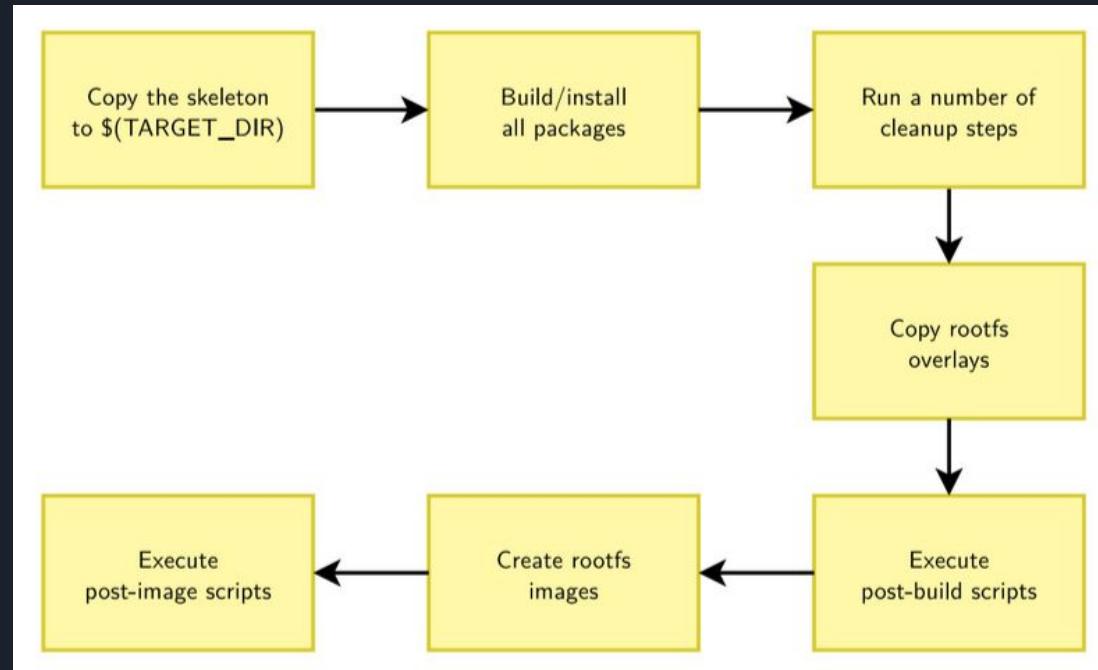
Foldery

https://refspecs.linuxfoundation.org/FHS_3.0/fhs-3.0.pdf

Można jak się 'podoba' - ale lepiej nie...

- /bin
- /dev
- /etc
- /home
- /lib
- /proc
- /sbin
- /sys
- /tmp
- /usr
- /var

Rootfs w buildroocie



src: <https://bootlin.com/>



Skeleton

Skeleton - paczka zawierająca szablon do standardowego rootfs'a

Jeśli nie chcemy standardowego, tworzymy nowy jako opcja
skeleton-custom

Domyślny skeleton jest dobry dla większości zastosowań



buildroot/system/skeleton

Baza dla obrazu

Demo



Permission table

system/device_table.txt

Domyślnie wszystkie pliki są własnością użytkownika root, a uprawnienia, z którymi zostały zainstalowane w \$(TARGET_DIR) są zachowane.

Aby dostosować własność lub uprawnienia zainstalowanych plików, można utworzyć jedną lub kilka tabel uprawnień BR2_ROOTFS_DEVICE_TABLE zawierającą oddzieloną spacjami listę plików tabeli uprawnień plików.

Domyślnie używany jest plik system/device_table.txt

Czym są minor i major numbers?

system/device_table_dev.txt - stary sposób, gdy węzły sprzętowe są tworzone statycznie

Zarządzanie użytkownikami: users_table

BR2_ROOTFS_USERS_TABLES - lista user table definiująca użytkowników

Składnia:

username	uid	group	gid	password	home	shell	groups	comment
foo	-1	bar	-1	!=blabla	/home/foo	/bin/sh	alpha,bravo	Foo user

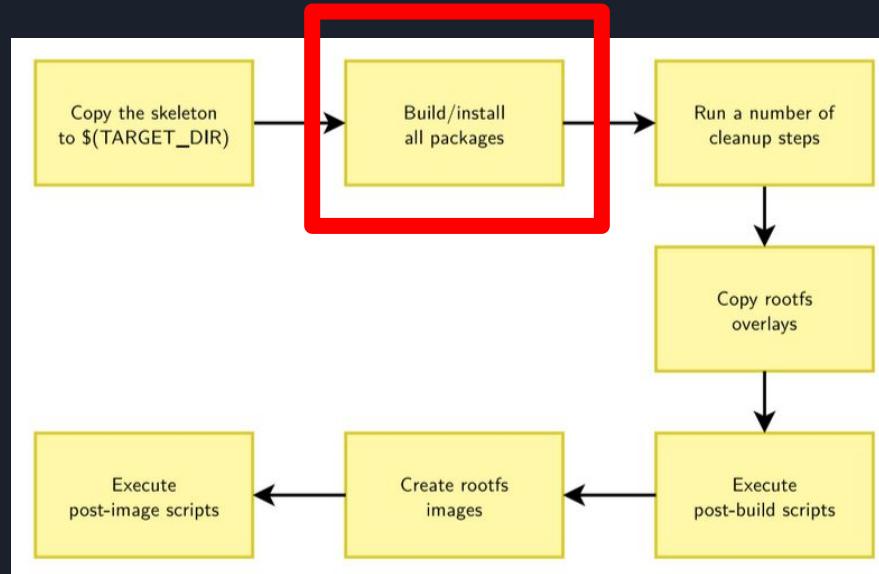
Przykład:

foo -1 bar -1 !=blabla /home/foo /bin/sh alpha,bravo Foo user

Źródło: <https://buildroot.org/downloads/manual/manual.html#makeuser-syntax>

Instalacja paczek

Wszystkie skonfigurowane packages są komplikowane i kopiowane do szkieletu





Cleanup

Czyścimy workspace z niepotrzebnych rzeczy żeby zmniejszyć rozmiar rootfsa

- Headery
- Pkg-config
- Man pages, documentation
- Czyszczenie programów i bibliotek przez wywołanie \$ strip

Dla konkretnych paczek mogą być dodatkowe kroki - np. Usuwanie niepotrzebnych plików pythona



Rootfs overlay

Nakładka na gotowy rootfs ("patch")

W łatwy sposób możemy dodawać własne pliki i foldery

```
karol.przybylski:~/prv/buildroot_rpi/buildroot$ grep ^BR2_ROOTFS_OVERLAY .config
```

```
BR2_ROOTFS_OVERLAY="board/raspberrypi4/rootfs_overlay"
```



Init systems

Program, który przejmuje kontrolę po inicjalizacji kernela. Zarządza userspace

Przykłady:

- Busybox (bardzo prosty)
- SysV
- systemd



Ćwiczenie

Rootfs

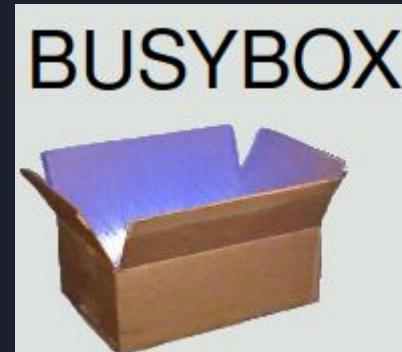
[6_rootfs.md](#)

Skąd wziąć wszystkie programy?

Opcja 1 - wszystko robimy sami

Shell: bash, ash, hush

Programy użytkowe: grep, vi etc.... Łącznie ok 50



Jak działa busybox

Nie wszystkie funkcje są wspierane

Np. \$ grep nie posiada żadnego przełącznika

Wszystkie narzędzia są jedną binarką

```
$ busybox cat file.txt
```

```
[applet]_main
```

```
› ls -la cat
```

```
lrwxrwxrwx 1 root root 7 wrz 27 22:45 cat -> busybox
```





Boot process - podsumowanie





ROM code

Firmware (SPL - Secondary Program Loader)

Bootloader (U-boot)

Kernel

Init (busybox/rootfs)



Devicetree





Devicetree

Q: Jaki mamy hardware?

Devicetree - struktura opisująca podłączony sprzęt

DTB - *device tree blob*

DTS - *device tree structure*

DTBO - *device tree overlay*

DTC - *device tree compiler*



Demo

<https://github.com/torvalds/linux/blob/3006adf3be79cde4d14b1800b963b82b6e5572e0/arch/arm64/kernel/setup.c#L184> - kernel

Struktura devicetree

<https://github.com/raspberrypi/linux/blob/rpi-6.6.y/arch/arm/boot/dts/broadcom/bcm2711-rpi-cm4.dts>

Kompilacja



Devicetree overlays

Jedno raspberry wspiera mnóstwo HW a ma ograniczone interfejsy

Różne DT na każdą okazję - chaos

Rozwiązanie - devicetree overlay, "nakłada się" na główne DT

Jedno DT + mnóstwo dtbo = wsparcie dla większości HW

Dodatkowo: firmware RPI patchuje samodzielnie devicetree, wiec w zasadzie tylko overlaye zostają



Ćwiczenie

Modyfikowanie i pisanie devicetree

Debugowanie

Build system