FACULTE DES SCIENCES DE TUNIS

Conception et implémentation des objets connectés

Dr. Ing. Chiheb Ameur ABID

Contact: chiheb.abid@fst.utm.tn

Année universitaire : 2021 - 2022

Plan

Présentation du port GPIO

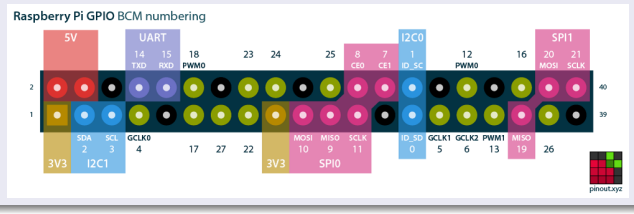
Présentation du GPIO sur RPi3

GPIO (General Purpose Input/Output) est un port d'entrées-sorties très utilisés dans le monde des microcontrôleurs et de l'électronique embarquée.

- Les GPIO sont gérés par les pilotes du noyau du système d'exploitation ☞ Il n'y a pas d'entrée/sortie analogique
- Linux reconnaît nativement les ports GPIO, une documentation complète est même disponible : www.kernel.org/doc/Documentation/gpio/gpio.txt
- Depuis la version 4.8 du noyau Linux, les GPIO sont accesibles par le pilote de périphérique ABI (Application Binary Interface) chardev GPIO via `/dev/gpiochipN` ou `/sys/bus/gpio`

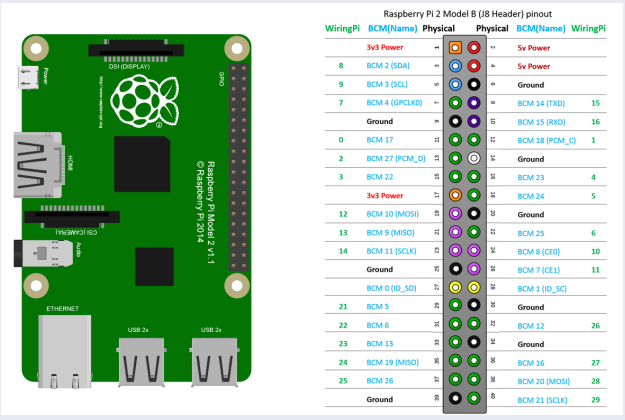
Présentation du port GPIO

Brochage



Présentation du port GPIO

Brochage



Présentation du port GPIO

Usage

- Une sortie peut être fixée sur un niveau haut (3V3) ou bas (0V). Une entrée peut être lue comme un niveau haut (3V3) ou bas (0V).
- Il est possible d'utiliser de résistances internes pull-up ou pull-down. Les GPIO2 et GPIO3 ont des résistances de pull-up fixes, mais pour les autres broches, elles peuvent être configurées logiciellement.
- Software PWM (Pulse-Width Modulation) disponible sur toutes les broches et Hardware PWM seulement sur GPIO12, GPIO13 et GPIO18
- I2C : SDA (GPIO2) SCL (GPIO3) et EEPROM Data (GPIO0) EEPROM Clock (GPIO1)
- Port série UART : TX (GPIO14) RX (GPIO15)
- SPI
  - SPI0 : MOSI (GPIO10) MISO (GPIO9) SCLK (GPIO11) CE0 (GPIO8) CE1 (GPIO7)
  - SPI1 : MOSI (GPIO20) MISO (GPIO19) SCLK (GPIO21) CE0 (GPIO18) CE1 (GPIO17) CE2 (GPIO16)

Avertissement

L'alimentation maximale pour chaque broche est de 16mA. L'alimentation maximale pour toutes les broches est de 51mA.

Niveaux logiques des entrées/sorties Tout Ou Rien (TOR)

Tout Ou Rien (TOR)

- Une entrée/sortie tout ou rien est une entrée/sortie binaire. Soit elle prend la valeur 0, ou la valeur 1
- La carte Raspberry est basée sur la technologie CMOS : Complementary Metal-Oxide Semiconductor
- Les niveaux logiques selon la technologie CMOS (des valeurs approximatives)

Symbol	Minimum	Maximum	Description
V_{IL}	0.0 volts	1/3 V_{DD} 30% V_{DD}	Logic value false (0)
V_{IH}	2/3 V_{DD} 70% V_{DD}	V_{DD}	Logic value true (1)

- Les niveaux logiques de la RPi

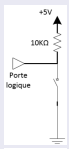
Symbol	Low	High	Description
V_{IL}	0.0 volts	0.8 volts	Logic value false (0)
V_{IH}	1.3 volts	V_{DD}	Logic value true (1)

Les entrées/sorties TOR

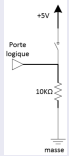
Les résistances PULL-UP/PULL-DOWN

- Si une entrée est laissée libre (non connectée), son potentiel sera flottant en fonction de l'électricité statique ou des perturbations électromagnétiques.
  - Utiliser une résistance soit pour tirer vers le haut le potentiel (3.3V), ou pour tirer vers le bas (0V)

- Résistance PULL-UP : au repos, le potentiel de l'entrée est à 3.3 V.



- Résistance PULL-DOWN : au repos, le potentiel de l'entrée est à 0 V.



Accès aux GPIOs avec `pigpio`

Compilation native avec la bibliothèque `pigpio`

- On utilise la bibliothèqe C de `pigpio`
- On utilise le dialecte moderne C++17
- Compilation native depuis la ligne de commande sur la Raspberry Pi
  `g++ nomProgramme.cpp -o nomExecutable -std=c++17 -lpigpio`
- Les programmes utilisant `pigpio` doivent avoir les droits d'accès de l'utilisateur `root` pour s'exécuter
  `sudo ./nomExecutable`

Accès aux GPIOs avec `pigpio`

Fonctions `pigpio`

- `int gpioInitialise(void)` : Initialiser la bibliothèque
  - Doit être appelée avant d'utiliser les autres fonctions de la bibliothèques
  - Elle retourne la version de la bibliothèque si l'initialisation est effectuée correctement, sinon elle retourne `PI_INIT_FAILED`
- `void gpioTerminate(void)` : Terminer l'utilisation de la bibliothèque
  - Libérer les ressources utilisées

Accès aux GPIOs avec `pigpio`

Fonctions `pigpio`

- `int gpioSetMode(unsigned gpio, unsigned mode)` : spécifier le mode d'accès à une broche
  - `gpio` : 0-53
  - `mode` : 0-7 ; `PI_INPUT`, `PI_OUTPUT`, `PI_ALT0`, `PI_ALT1`, `PI_ALT2`, `PI_ALT3`, `PI_ALT4` ou `PI_ALT5`
- `int gpioGetMode(unsigned gpio)` : retourne le mode d'accès d'une broche
  - `gpio` : 0-53
  - S'il y a une erreur, elle retourne `PI_BAD_GPIO`
- `int gpioSetPullUpDown(unsigned gpio, unsigned pud)` : définir une résistance pull-up ou pull-down à une broche
  - `pud` : 0-2 ; `PI_PUD_OFF`, `PI_PUD_DOWN` ou `PI_PUD_UP`

Accès aux GPIOs avec `pigpio`

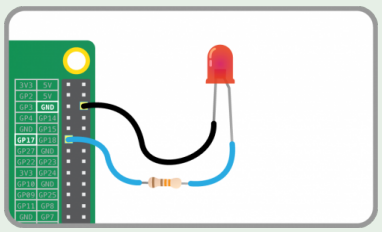
Fonctions `pigpio`

- `int gpioWrite(unsigned gpio, unsigned level)` : spécifier l'état d'une broche de sortie
  - `gpio` : 0-53
  - `level` : 0 ou 1
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_GPIO` ou `PI_BAD_LEVEL`
  - Elle désactive la génération d'un signal PWM
- `int gpioRead(unsigned gpio)` : retourne l'état d'une broche
  - `gpio` : 0-53
  - S'il y a une erreur, elle retourne `PI_BAD_GPIO`

Accès aux GPIOs avec C et C++

Exemple : flasher une diode LED

➥ On considère le montage suivant



Accès aux GPIOs avec C et C++

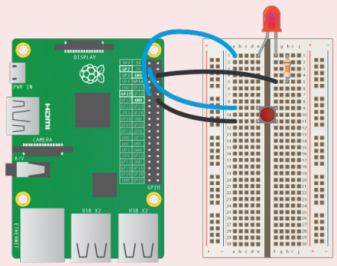
Exemple : flasher une diode LED

```cpp
#include <iostream>
#include <unistd.h>
#include <pigpio.h>

constexpr uint8_t O_LED=17; // Using GPIO17
using namespace std;
int main(int argc, char *argv[]) {
   cout << "Running pigpio program" << endl;
   gpioInitialise(); // you MUST initialize the library !
   gpioSetMode(O_LED, PI_OUTPUT);
   while (1) {
      gpioWrite(O_LED, 1);
      sleep(1);
      gpioWrite(O_LED, 0);
      sleep(1);
   }
   cout << "gpioTerminate()..." << endl;
   gpioTerminate(); // call this when done with library
   return 0;
}
```


Accès aux GPIOs avec C et C++

Exercice : contrôler l'état d'une diode LED à l'aide d'un bouton

➥ Écrire un programme qui change l'état de la diode LED à chaque appuie sur le bouton poussoir



Accès aux GPIOs avec C et C++

Exercice : contrôler l'état d'une diode LED à l'aide d'un bouton

```cpp
#include <iostream>
#include <pigpio.h>

constexpr uint8_t O_LED=17; // Using GPIO17
constexpr uint8_t I_PUSH=2; // Using GPIO2

int main(int argc, char *argv[]) {
   if (gpioInitialise() < 0) {
      std::cout << "Failure..." << endl;
      exit(-1);
   }
   gpioSetMode(O_LED, PI_OUTPUT);
   gpioSetMode(I_PUSH, PI_INPUT);
   gpioSetPullUpDown(I_PUSH, PI_PUD_UP);
   while (1) {
      if (gpioReadD(I_PUSH) == 0) {
         while (gpioReadD(I_PUSH) == 0) ;
         gpioWrite(O_LED, !gpioRead(O_LED));
      }
   }
   gpioTerminate();
   return 0;
}
```

Plan

Programmation Parallèle

Les threads

- Programmation concurrente
  - Travailler sur plusieurs tâches à la fois
- Un thread (tâche) représente (généralement) une fonction (une méthode) en cours d'exécution
- Un processus peut contenir un ou plusieurs threads. Ces threads partagent alors la mémoire ainsi que diverses autres ressources*
  - Deux threads qui veulent collaborer peuvent le faire par l'intermédiaire de variables partagées.
  - Le contexte d'un thread est léger par rapport à un processus

Programmation concurrentielle

Création d'un thread

```
1  #include <iostream>
2  #include <thread>
3  void hello()
4  {
5   std::cout<<"Hello Concurrent World\n";
6  }
7  int main()
8  {
9   std::thread t(hello);
10  t.join();
11 }
```


Programmation concurrentielle

Section critique

- Partie d'un thread dont l'exécution ne doit pas entrelacer avec d'autres threads
  - Indivisibilité de la section critique
- Une fois un thread entre dans la section critique
  - Le thread qui entre dans la SC doit terminer son travail en empêchant les autres threads de jouer sur les mêmes données
  - La section critique doit être verrouillée afin de devenir invisible

Programmation concurrentielle

Problème de section critique

- Lorsqu'un thread manipule une donnée (ressource) partagée avec d'autres, nous disons qu'il se trouve dans une section critique
- Le problème de la SC est de trouver un algorithme d'exclusion mutuelle de threads
  - ☞ Les résultats de leurs actions ne dépend pas de l'ordre de leur entrelacement
- L'exécution de la section critique doit être mutuellement exclusive et indivisible
  - ☞ Un seul thread exécute la SC

Programmation concurrentielle

Coordination par les `mutex`

- Un mutex (mutual exclusion) est une structure de données qui permet de contrôler l'accès à une ressource
- Un mutex qui contrôle une ressource peut se trouver dans deux états
  1. Libre (unlocked) : indique que la ressource est libre et peut être utilisée sans risquer de provoquer une violation d'exclusion mutuelle
  2. Réservée (locked) : indique que la ressource associée est actuellement utilisée et qu'elle ne peut pas être utilisée par un autre thread

Programmation concurrentielle

Mutex : protection des variables partagées

```
1  #include <list>
2  #include <mutex>
3  #include <algorithm>
4  std::list<int> some_list;
5  std::mutex some_mutex;
6  void add_to_list(int new_value) // Thread 1
7  {
8     std::lock_guard guard(some_mutex);
9     some_list.push_back(new_value);
10 }
11 bool list_contains(int value_to_find) // Thread 2
12 {
13    std::lock_guard<std::mutex> guard(some_mutex);
14    return std::find(some_list.begin(),some_list.end(),value_to_find)!= some_list.end();
15 }
```

1. `std::list<int> some_list` : variable globale, donc elle est une variable partagée
2. `std::mutex some_mutex` : instance de mutex, le même mutex doit être accessibles aux différents threads
3. `std::lock_guard guard(some_mutex)` : protège la section critique

Programmation concurrentielle

Les variables atomiques

- La classe `atomic<T>` représente un type sur lequel les opérations sont atomiques
  - ☞ Les opérations s'exécutent dans un thread sans interférences avec un autre
  - ☞ Cette classe est définie dans le fichier d'entête `<atomic>`

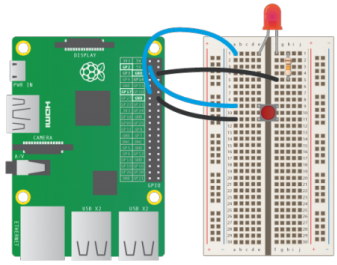
```
std::atomic<bool>
std::atomic<char>
std::atomic<signed char>
std::atomic<unsigned char>
std::atomic<int>
std::atomic<unsigned>
std::atomic<short>
std::atomic<unsigned short>
std::atomic<long>
std::atomic<unsigned long>
std::atomic<long long>
std::atomic<unsigned long long>
std::atomic<char16_t>
std::atomic<char32_t>
std::atomic<wchar_t>
```

Programmation concurrentielle

Mise en application

Créer deux threads :

1. Un premier thread flashe une diode LED connectée à BCM17 à chaque seconde
2. Un deuxième thread active/désactive le flashage de la diode LED à chaque appuie d'un bouton poussoir connecté à BCM2



Programmation concurrentielle

Mise en application

```
#include <iostream>
#include <unistd.h>
#include <pigpio.h>
#include <thread>
#include <atomic>
constexpr uint8_t O_LED = 17; // BCM17
constexpr uint8_t I_BUTTON = 2; // BCM2
volatile std::atomic<bool> flashEnabled = false; //volatile: tell compiler to not optimize

void flash() {// Flash the LED
   while (1)
      if (flashEnabled) {
         gpioWrite(O_LED, 1);
         sleep(1);
         gpioWrite(O_LED, 0);
         sleep(1);
      }
}

void readButtonState() { // Check whether the Button pressed
   while (1)
      if (gpioRead(I_BUTTON)==0) {
         while (gpioRead(I_BUTTON)==0);
         flashEnabled=!flashEnabled;
      }
}
```


Programmation concurrentielle

Mise en application

```
int main(int argc, char *argv[]) {
   if (gpioInitialise() < 0) {
      std::cout << "Echec d'initialisation...\n";
      exit(-1);
   }
   gpioSetMode(O_LED, PI_OUTPUT);
   gpioSetMode(I_BUTTON, PI_INPUT);
   gpioSetPullUpDown(I_BUTTON,PI_PUD_UP);
   std::thread t1(flash);
   std::thread t2(readButtonState);
   while (1);
   gpioTerminate();
   return 0;
}
```


Plan

L'intérêt des interruptions

Comment vérifier une condition/évènement ?

➥ Vérifier qu'une broche d'entrée prends la valeur 1 ! ?

❶ Attente active

```
while (1) {
   while (gpioRead(BROCHE)==0);
   Action 1
   Action 2
   ...
   Action n
}
```

✖ Le processeur est bloqué sur la vérification de l'évènement

L'intérêt des interruptions

Comment vérifier une condition/évènement ?

➥ Vérifier qu'une broche d'entrée prends la valeur 1 ! ?

❷ Lecture par scrutation (Polling)

```
while (1) {
   Action 1
   Action 2
   ...
   if (gpioRead(BROCHE)==1) Action();
   Action i
   ...
   Action n
}
```

✔ Simple à mettre en oeuvre

✖ Il est possible de louper certains évènements

✖ Consomme du temps processeur

Interruptions

Comment vérifier une condition/évènement ?

➥ Vérifier qu'une broche d'entrée prends la valeur 1 ! ?

❸ Les interruptions

```
/***
* Programme principal
***/
while (1) {
   Action 1
   Action 2
   ...
   Action n
}

/***
* Routine de gestion d'interruption
***/
void ISR() {
   Actions
}
```

✔ La fonction `ISR` est appelée à chaque demande d'interruption (IRQ)

✔ La charge de vérification du changement de la valeur est déléguée au contrôleur d'interruptions

Interruptions

Détection de changement de l'état d'une entrée

➥ Libérer le processeur en confiant la surveillance au contrôleur d'interruptions

➥ Lorsque un changement provient sur une entrée ou suite à un évènement, le processeur est avisé à travers une demande d'interruption (Interrupt ReQuest) afin d'interrompre son travail actuel et exécuter le traitement adéquat en faisant appel à une fonction ISR (Interrupt Service Routine)

✔ Alléger la charge du processeur

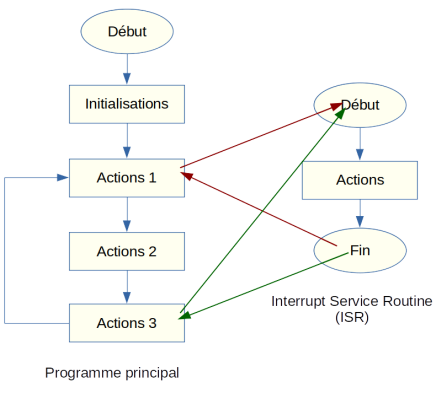
✔ Réaction plus rapide aux évènements reçus

Avertissement

Raspberry OS n'est pas un système temps réel

Interruptions

Gestion des interruptions



Interruptions et GPIO

Gestion des interruptions avec `pigpio`

- `int gpioSetAlertFunc(unsigned user_gpio, gpioAlertFunc_t f)` : spécifier une fonction (callback) appelée suite à un changement d'état (demande d'interruption) d'une broche
  - `user_gpio` : 0-31
  - `f` : la routine de gestion d'interruption. `f` doit être écrite selon le type `typedef void (*gpioAlertFunc_t) (int gpio, int level, uint32_t tick);`
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`
- `int gpioSetAlertFuncEx(unsigned user_gpio, gpioAlertFuncEx_t f, void *userdata)` : permet aussi de spécifier des données arbitraires à travers `userdata`

Avertissement

- Une seule fonction callback peut être associée à une broche
- Pour désactiver la fonction callback, il faut passer la valeur `nullptr` au deuxième argument de l'appel de `gpioSetAlertFunc()` ou de `gpioSetAlertFuncEx()`

Interruptions et GPIO

Exemple : changer l'état d'une diode LED à chaque appuie d'un bouton poussoir

```
#include <iostream>
#include <unistd.h>
#include <pigpio.h>

constexpr uint8_t O_LED=17; // Using GPIO17
constexpr uint8_t I_PUSH=2; // Using GPIO2
using namespace std;
void cbPushButton(int gpio, int level, uint32_t tick) {
   if (level==0) gpioWrite(O_LED,!gpioRead(O_LED));
}
int main(int argc, char *argv[]) {
   cout << "Running pigpio program" << endl;
   if (gpioInitialise()<0) {
      cout<<"Failure..."<<endl;
      exit(-1);
   }
   gpioSetMode(O_LED, PI_OUTPUT);
   gpioSetMode(I_PUSH,PI_INPUT);
   gpioSetPullUpDown(I_PUSH,PI_PUD_UP);
   gpioSetAlertFunc(I_PUSH,cbPushButton);
   while (1);
   gpioTerminate();
   return 0;
}
```


Interruptions et GPIO

Gestion des interruptions avec `pigpio`

- `int gpioSetISRFunc(unsigned user_gpio, unsigned edge, int timeout, gpioISRFunc_t f)` : spécifier l'ISR relative à une interruption produite par une broche
  - `user_gpio` : 0-31
  - `edge` : 0-2; `RISING_EDGE`, `FALLING_EDGE` ou `EITHER_EDGE`
  - `timeout` : temps maximal pour gérer une demande d'interruption. Valeur négative pour désactiver le timeout
  - `f` : la routine de gestion d'interruption. `f` doit être écrite selon le type `typedef void (*gpioISRFunc_t) (int gpio, int level, uint32_t tick);`
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`, `PI_BAD_EDGE` or `PI_BAD_ISR_INIT`
- `int gpioSetISRFuncEx(unsigned user_gpio, unsigned edge, int timeout, gpioISRFunc_t f,void *userdata)` : permet aussi de spécifier des données arbitraires à travers `userdata`

Interruptions et GPIO

Exemple : changer l'état d'une diode LED à chaque appuie d'un bouton poussoir

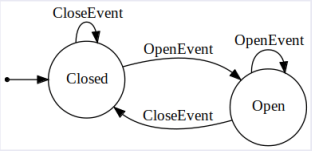
```
#include <iostream>
#include <unistd.h>
#include <pigpio.h>

constexpr uint8_t O_LED=17; // Using GPIO17
constexpr uint8_t I_PUSH=2; // Using GPIO2
using namespace std;
void cbPushButton(int gpio, int level, uint32_t tick) {
   gpioWrite(O_LED,!gpioRead(O_LED));
}
int main(int argc, char *argv[]) {
   cout << "Running pigpio program" << endl;
   if (gpioInitialise()<0) {
      cout<<"Failure..."<<endl;
      exit(-1);
   }
   gpioSetMode(O_LED, PI_OUTPUT);
   gpioSetMode(I_PUSH,PI_INPUT);
   gpioSetPullUpDown(I_PUSH,PI_PUD_UP);
   gpioSetISRFunc(I_PUSH,FALLING_EDGE,cbPushButton);
   while (1);
   gpioTerminate();
   return 0;
}
```


Plan

Les machines à états

Les machines à états

- Un automate fini ou machine à états finis (finite state machine) est un modèle mathématique pour la modélisation de comportement de systèmes numériques
  - Son rôle, est de décrire le fonctionnement d'une machine (ou d'un objet) ayant un comportement **séquentiel**
  - Modèle graphique
  - Utilisé dans de nombreux domaines : conception de programmes informatiques, protocoles de communication, contrôle des processus, analyse linguistique, etc.



Les machines à états

Les machines à états

- Dans un système séquentiel, le comportement d'une machine (ou d'un objet) dépend non seulement des évènements qu'il reçoit mais aussi de ce qui s'est passé avant ces évènements.
  - Par exemple, on ne peut pas faire descendre un ascenseur s'il est déjà en bas
  - Les machines ayant un fonctionnement séquentiel passent par un nombre de situations (états) limitées et clairement identifiées. Nous disons alors que ce sont des machines à états **finis**.

Les machines à états

Les machines à états

- Une machine à états est construite de quatre éléments de base
  - Des états
  - Des évènements
  - Des transitions
  - Des actions

États

- Un état est une situation stable qui possède une certaine durée pendant laquelle un objet exécute une activité ou attend un évènement
- Un état représenté par un cercle dans lequel le nom de l'état est inscrit

Les machines à états

Transitions

- Une transition définit la réponse d'un objet à l'arrivée d'un évènement. Elle indique qu'un objet qui se trouve dans un état peut « transiter » vers un autre état en exécutant éventuellement certaines activités
- Une transition est représentée par une flèche allant de l'état de départ vers l'état d'arrivée

Évènements

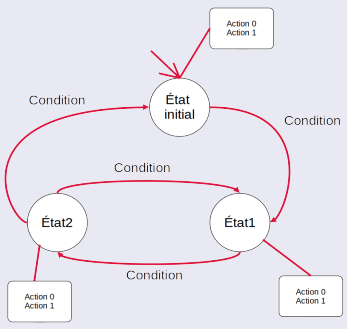
- Un évènement est un fait qui déclenche le changement d'état, qui fait donc passer un objet d'un état à un autre état
- Un évènement se produit à un instant précis et est dépourvu de durée. Quand un événement est reçu, une transition peut être déclenchée et faire basculer l'objet dans un nouvel état.
- Un évènement est représenté par une expression inscrite sur une transition

Actions

- Une action consiste à envoyer un signal, à faire appel à une méthode, à affecter une valeur à un attribut, etc.

Les machines à états

Représentation graphique d'une machine à états



Les machines à états

Traduction d'une machine à états en C++

- Définir un type énumératif

```
enum class State {etatInitial, etat1, etat2, ...};
```

- Définir une variable globale pour mémoriser l'état courant

```
State etat;
```

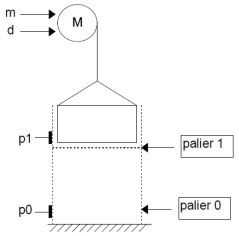
- L'implémentation de la machine états se fait par un `switch` en créant un `case` pour chaque état

```
switch(etat) {
case State::etatInitial: // Actions de etatInitial
  if (cond) { // Condition de transition
    // Actions juste avant la transition
    etat=etatSuivant;
  }
  break;
case State::etat0: ...
}
```

Les machines à états

Exercice

- On se propose de réaliser la commande d'une monte-charge. Le moteur est commandé par deux signaux `m` et `d` pour montée et descente. Cette commande élabore ces commandes à partir de ses entrées `B`, `p1` et `p0` suivant le cahier des charges suivant :
  - À l'initialisation, la monte-charge doit descendre au palier 0
  - Quand la cabine est entre deux paliers, la dernière commande (`m` ou `d`) est maintenue
  - Quand la cabine est à un palier, si `B` est inactif elle s'arrête, si B est actif, elle change de palier
  - L'entrée `p0` (respectivement `p1`) indique, lorsqu'elle est active, que la monte charge est au palier 0 (respectivement palier 1).



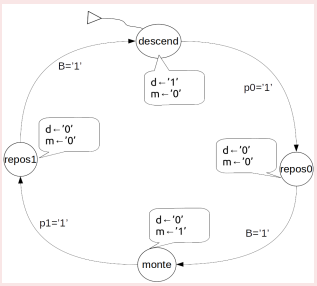
Les machines à états

Exercice

- Donner la machine à états qui décrit la commande de monte-charge
- Donner le programme C/C++ implémentant la commande en adoptant les connexions suivantes : `m` GPIO14, `d` GPIO15, `B` GPIO17, `p0` GPIO18 et `p1` GPIO27

Les machines à états

Correction (1/3)



Les machines à états

Correction (2/3)

```
1  #include <iostream>
2  #include <unistd.h>
3  #include <pigpio.h>
4
5  constexpr uint8_t m = 14;
6  constexpr uint8_t d = 15;
7  constexpr uint8_t B = 17;
8  constexpr uint8_t p0 = 18;
9  constexpr uint8_t p1 = 27;
10 enum class State {descend, repos0, monte, repos1};
11
12 State etat;
13 int main(int argc, char *argv[]) {
14    if (gpioInitialise() < 0) {
15       std::cout << "Echec d'initialisation...\n";
16       exit(-1);
17    }
18
19    etat = State::descend;
20    gpioSetMode(m,PI_OUTPUT);gpioSetMode(d,PI_OUTPUT);
21    gpioSetMode(p0,PI_INPUT);
22    gpioSetMode(p1,PI_INPUT);
23    gpioSetMode(B,PI_INPUT);
```

Les machines à états

Correction (3/3)

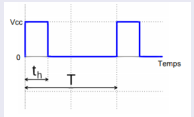
```
   while (1) {
      switch (etat) {
         case State::descend:
            gpioWrite(m,0);
            gpioWrite(d,1);
            if (gpioRead(p0)) etat = State::repos0;
            break;
         case State::repos0:
            gpioWrite(m,0);
            gpioWrite(d,0);
            if (gpioRead(B)) etat = State::monte;
            break;
         case State::monte:
            gpioWrite(m,1);
            gpioWrite(d,0);
            if (gpioRead(p1)) etat = State::repos1;
            break;
         case State::repos1:
            gpioWrite(m,0);
            gpioWrite(d,0);
            if (gpioRead(B)) etat = State::descend;
            break;
         }
   }
   gpioTerminate();
   return 0;
}
```


Plan

Les canaux Pulse Width Modulation (PWM)

Le signal Pulse Width Modulation (PWM)

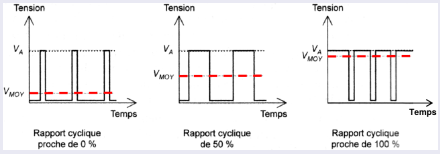
- Un signal PWM ou Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI) est un signal numérique périodique (de fréquence constante) et de rapport cyclique variable
  - T désigne la période, la fréquence du signal est $f = 1/T$
  - Le rapport cyclique (duty cycle) = t_h/T



Les canaux Pulse Width Modulation (PWM)

Intérêts

- Contrôler la puissance de la sortie



- Générer un signal pseudo-analogique

Génération de PWM avec la RPi3

Connectiques des broches PWM

- Sur la RPi3, seulement la broche GPIO18, GPIO12 et GPIO13 peuvent générer des signaux PWM matériel (25 Mhz)
  - `GPIO18` et `GPIO12` sont connectés au même canal PWM 0
  - `GPIO13` est connecté au canal PWM 1
  - Ces deux canaux sont utilisées aussi pour la génération des signaux sonores
- Les autres broches peuvent aussi générer des signaux PWM logiciels (threads) ou en utilisant le DMA (Direct Memory Access)
  - La fréquence maximale en utilisant les threads : 10 Khz
  - La fréquence maximale en utilisant le DMA : 1 Mhz

Génération de PWM avec la RPi3

Génération de PWM avec `pigpio` : contrôler le rapport cyclique

- `int gpioPWM(unsigned user_gpio, unsigned dutycycle)` : génère un signal PWM sur une broche de sortie
  - `user_gpio` : 0-31
  - `dutyecycle` : 0-`RANGE`; 0 pour rapport cyclique minimal et `RANGE (255)` pour rapport cyclique maximal
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO` ou `PI_BAD_DUTYCYCLE`
- `int gpioGetPWMdutycycle(unsigned user_gpio)` : retourne le rapport cyclique pour une broche générant un signal PWM
  - `user_gpio` : 0-31
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO` ou `PI_NOT_PWM_GPIO`

Génération de PWM avec la RPi3

Génération de PWM avec `pigpio` : contrôler la fréquence

- `int gpioSetPWMfrequency(unsigned user_gpio, unsigned frequency)` : définit la fréquence pour la génération d'un signal PWM sur une broche de sortie
  - `user_gpio` : 0-31
  - `frequency` : `0<=frequency<=1000000` fréquence en hertz. La fréquence réellement utilisée dépend de taux d'échantillonnage
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`
- `int gpioGetPWMfrequency(unsigned user_gpio)` : retourne la fréquence réellement utilisée en hertz
  - `user_gpio` : 0-31
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`

Génération de PWM avec la RPi3

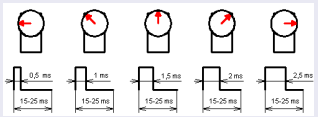
Exemple : allumer et éteindre progressivement une diode LED connectée à BCM17

```
1  #include <iostream>
2  #include <unistd.h>
3  #include <pigpio.h>
4
5  constexpr uint8_t O_LED=17;
6
7  int main(int argc, char *argv[]) {
8     if (gpioInitialise() < 0) {
9        std::cout << "Failure...\n";
10       exit(-1);
11    }
12    gpioSetMode(O_LED,PI_OUTPUT);
13    while (1) {
14       for (uint16_t i=0;i<256;i++) {
15          gpioPWM(O_LED,i);
16          sleep(50);
17       }
18       for (uint16_t i=255;i>0;i--) {
19          gpioPWM(O_LED,i);
20          sleep(50);
21       }
22    }
23    gpioTerminate();
24    return 0;
25 }
```

Génération de PWM

Génération de PWM avec `pigpio` : contrôler un servomoteur

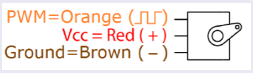
- Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe.
- Un servomoteur est asservi en position angulaire à travers un signal PWM
- Le servomoteur `SG90 9 g Micro Servo`



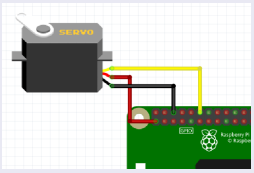
Génération de PWM

Génération de PWM avec `pigpio` : contrôler un servomoteur

- Connexions du servomoteur SG90



- Montage : l'entrée PWM du servomoteur est connectée à BCM18



Génération de PWM pour contrôler un servomoteur

Génération de PWM avec `pigpio` : contrôler un servomoteur

- `int gpioServo(unsigned user_gpio, unsigned pulsewidth)` : spécifie la largeur de pulsation pour le contrôle d'un servomoteur
  - `user_gpio` : 0-31
  - `pulsewidth` : `0` (pas de signal), `500-2500`
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`
  - Le signal PWM généré est de fréquence 50 Hz
- `int gpioGetServoPulsewidth(unsigned user_gpio)` : renvoie la largeur de pulsation d'un signal servo produit sur une sortie
  - `user_gpio` : 0-31
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_USER_GPIO`

Génération de PWM avec la RPi3

Exemple : contrôler un servomoteur

```
1  #include <iostream>
2  #include <unistd.h>
3  #include <pigpio.h>
4
5  int main(int argc, char *argv[]) {
6     if (gpioInitialise() < 0) {
7        std::cout << "Failure...\n";
8        exit(-1);
9     }
10    while (1) {
11       uint16_t position;
12       do {
13          std::cout<<"Donner la position angulaire entre 0 et 180 :";
14          std::cin>>position;
15       } while (position>180);
16       uint16_t dureePulsation=500+(position*2000)/180;
17       gpioServo(18,dureePulsation);
18    }
19    gpioTerminate();
20    return 0;
21 }
```

Plan

Bus

Définition d'un bus

- lignes de données : liaison bidirectionnelle qui assure le transfert des informations entre un élément et un autre
- lignes d'adresses : liaison bidirectionnelle qui permet la sélection des informations à traiter dans un emplacement mémoire.
- lignes de commandes : liaison pour assurer la synchronisation des flux d'informations sur les bus de données et d'adresses : l'horloge (« clock »), demandes d'interruption et d'accord (« acknowledge »), arbitrage des échanges, le contrôle des échanges (read/write, type de transfert, types des données, etc.)

Bus

Types de bus

- Bus série (i2c, uart, spi, usb, etc.) : permettent de relier entre un certain nombre de circuits en transmettant les données bit par bit
  - ✔ Lenteur (remède : augmenter la fréquence de transimission)
  - ✖ Résistant aux perturbations
  - ✖ Économique (moins de fils)
  - ✖ Adapté aux systèmes embarqués (moins d'espace)
- Bus parallèle (AGP, PCI, etc.) : est un ensemble de conducteurs électriques parallèles
  - À chaque cycle de temps, chaque conducteur transmet un bit
  - Les tailles les plus courantes (en bits) sont : 8, 16, 32, 64 ou plus
  - ✖ Couteux et encombrant
  - ✖ Moins résistant aux perturbations
  - ✔ Rapidité

Communication

Principe de communication

- Les communications se font par signaux
  - via un port : point de connexion
  - sur un bus : contient plusieurs câbles et se définit par le protocole (règles) de comunication.
  - grâce à un contrôleur : les données échangés entre un périphérique et le processeur transitent par l'interface (contrôleur) associé à ce périphérique. L'interface possède de la mémoire tampon pour stocker les données échangées. Le contrôleur stocke aussi les informations nécessaire à la gestion de la communication

Communication

Caractéristiques

- Simplex/Duplex
  - Simplex : les données circulent dans un seul sens : émetteur vers récepteur (exemple : souris->ordinateur, ordinateur -> imprimante)
  - Half-duplex : les données circulent dans les 2 sens mais pas simultanément : la bande passante est utilisée en intégralité (aussi appelé alternat ou semi-duplex). Exemple : talkie/walkies, êtres humains (on ne coupe pas la parole).
  - Full-duplex : les données circulent de manière bidirectionnelle et simultanément : la bande passante est divisée par 2 pour chaque sens (duplex intégral).

Communication

Caractéristiques

- Rapidité : taux de transfert
- Il existe 2 unités pour qualifier la rapidité des échanges
  - Bauds : nombre de bits de données transmis par seconde
  - Bits/sec : nombres de bits (quelconques) transmis par seconde

Communication

Caractéristiques

- Synchrone/asynchrone
- Pour une liaison série, un seul fil transporte l'information
  - Problème de synchronisation entre émetteur et récepteur (distinguer et reconnaître les séquences de bits utiles)

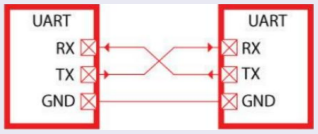
1. Communication synchrone : l'émetteur et le récepteur sont cadencés à la même fréquence d'horloge
   - Un signal horloge commun
2. Communication asynchrone : la synchronisation est imposée par le protocole
   - La transmission se fait caractère par caractère

Plan

Principe de communication série avec UART

Principe de communication série avec UART

- UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) est un contrôleur de communication série, asynchrone et full-duplex



  - Une donnée est envoyée bit par bit
  - L'envoie d'une donnée (7/8 bits) s'effectue sous forme d'une trame
  - La vitesse de transmission est mesurée en bauds (bits de données par seconde) : 50, 75, 110, 134, 150, 200, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, ou 230400

Principe de communication série avec UART

Principe de communication série avec UART

- L'envoie de données se fait octet par octet (mode caractère)
- Une trame UART pour envoyer un caractère

  - Un bit de démarrage (start bit) dont le niveau logique est zéro
  - Entre 7 et 8 bits de données
  - Éventuellement un bit de parité paire ou impaire (parity)
  - Un ou deux bits de stop avec un niveau logique de zéro (stop bits)

Principe de communication série avec UART

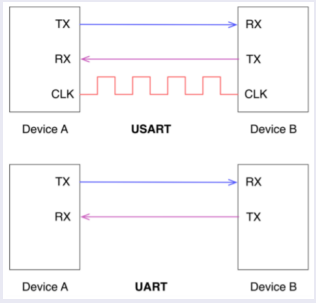
Avantages et inconvénients

- Avantages
  - ✔ Standardisée, universelle
  - ✔ Pas chère : 3 fils suffisent (émission Tx, réception Rx, masse GND) et souvent l'alimentation + 5 V
- Inconvénients
  - ✖ Lenteur
  - ✖ Ne permet de relier que deux périphériques

Communication UART

Extensions du protocole UART

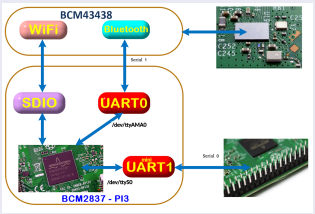
- USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)
  - On rend le protocole synchrone en ajoutant une ligne d'horloge, contrôlé par une des parties



Communication UART

Contrôleurs UART de la RPi

- Deux contrôleurs UART sont installés sur la RPi



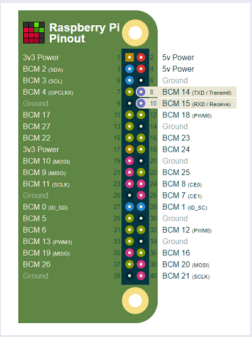
Par défaut, le bluetooth utilise UART pour se connecter au SoC, alors que les pins GPIO8 et GPIO10 utilisent un mini-UART

- UART0 : un véritable contrôleur UART utilisé par défaut par le bluetooth
- UART1 : un mini-contrôleur UART dont le générateur de fréquence dépend du signal horloge du processeur
  - La fréquence du signal horloge du processeur est variable

Communication UART

Branchements

- On utilisera un câble TTL/USB (Transistor-Transistor Logic / Universal Serial Bus)



Communication UART

Communication UART avec `pigpio`

- `int serOpen(char *sertty, unsigned baud, unsigned serFlags)` : Ouvrir une communication série
  - `sertty` : spécifie le périphérique série à ouvrir dont le nom doit commencer par `/dev/tty` ou `/dev/serial`
  - `baud` : le débit de transmissions en bauds : 50, 75, 110, 134, 150, 200, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, ou 230400
  - `serFlags` :doit être à 0 (pas de drapeaux définis)
  - Retourne un handle >= 0 pour le périphérique dont l'adresse est spécifiée si OK, sinon `PI_NO_HANDLE` ou `PI_SER_OPEN_FAILED`
- `int serClose(unsigned handle)` : termine la communication série avec le périphérique ayant le handle spécifié
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `serOpen()`
  - Retourne 0 si OK, sinon `PI_BAD_HANDLE`

Communication UART

Communication UART avec `pigpio`

- Les fonctions d'envoie
  `int serWriteByte(unsigned handle, unsigned bVal)` : envoyer un seul octet
  `int serWrite(unsigned handle, char *buf, unsigned count)` : envoyer `count` octets spécifiés par le tableau `buf`
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `serOpen()`
  - Renvoie 0 si OK, sinon `PI_BAD_HANDLE`, `PI_BAD_PARAM` ou `PI_SER_WRITE_FAILED`

Communication UART

Communication UART avec `pigpio`

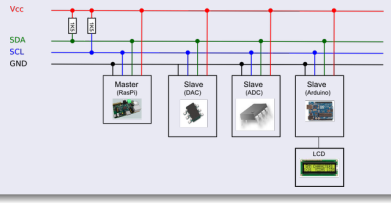
- Les fonctions de réception
  `int serReadByte(unsigned handle)` : lire un seul octet
  `int serRead(unsigned handle, char *buf, unsigned count)` : lire `count` octets et les sauvegarder dans `buf`
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `serOpen()`
  - Renvoie 0 si OK, sinon `PI_BAD_HANDLE`, `PI_BAD_PARAM` ou `PI_SER_READ_NO_DATA`
- `int serDataAvailable(unsigned handle)` : renvoie le nombre d'octets disponibles pour la réception

Plan

Le bus I2C

Le bus I2C

- I2C est un bus permettant la communication synchrone en half-duplex
- Le protocole de communication permet de mettre en communication un composant maître (généralement le microprocesseur) et plusieurs périphériques esclaves
- Plusieurs maîtres peuvent partager le même bus, et un même composant peut passer du statut d'esclave à celui de maître ou inversement.
- La communication n'a lieu qu'entre un seul maître et un seul esclave.
- Chaque esclave possède un identifiant unique (adresse). Cette adresse est fournie par l'esclave.



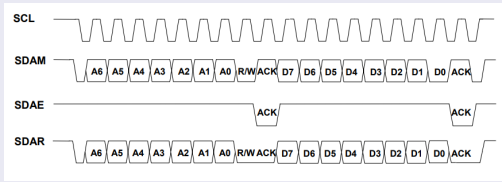
Communication sur I2C

Principe de communication sur I2C

1. Le Maître envoie sur le bus l'adresse du composant avec qui il souhaite communiquer,
2. Chacun des esclaves ayant une adresse fixe, l'esclave qui se reconnaît répond à son tour par un signal de confirmation,
3. Puis le Maître continue la procédure de communication : écriture/lecture
4. Les transactions devraient être confirmées par un ACK (acquittement)

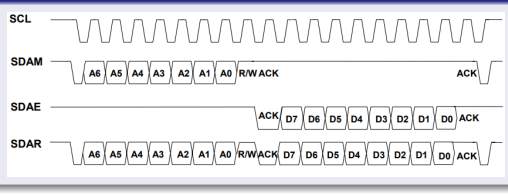
Communication sur I2C

Envoie d'une donnée



Communication sur I2C

Lecture d'une donnée



Le bus I2C

Communication I2C avec `pigpio`

- `int i2cOpen(unsigned i2cBus, unsigned i2cAddr, unsigned i2cFlags)` : initialise la communication sur le bus I2C pour un périphérique
  - `i2cBus` : >=0 ; spécifie le bus i2c à utiliser
  - `i2cAddr` : 0-0x7F ; spécifie l'adresse du périphérique sur le bus i2c
  - `i2cFlags` :doit être à 0 (pas de drapeaux définis)
  - Retourne un handle >= 0 pour le périphérique dont l'adresse est spécifiée si OK, sinon `PI_BAD_I2C_BUS`, `PI_BAD_I2C_ADDR`, `PI_BAD_FLAGS`, `PI_NO_HANDLE` ou `PI_I2C_OPEN_FAILED`
- `int i2cClose(unsigned handle)` : termine la communication sur le bus i2c avec le périphérique ayant le handle spécifié
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `i2cOpen()`

Le bus I2C

Communication I2C avec `pigpio`

- Les fonctions d'envoie
  `int i2cWriteQuick(unsigned handle, unsigned bit)` : envoyer un seul bit
  `int i2cWriteByte(unsigned handle, unsigned bVal)` : envoyer un seul octet
  `int i2cWriteDevice(unsigned handle, char *buf, unsigned count)` : envoyer jusqu'à 32 octets
  `int i2cWriteByteData(unsigned handle, unsigned i2cReg, unsigned bVal)` : écrire un seul octet dans un registre
  `int i2cWriteWordData(unsigned handle, unsigned i2cReg, unsigned wVal)` : écrire un mot (16 bits) dans un registre
  `int i2cWriteI2CBlockData(unsigned handle, unsigned i2cReg, char *buf, unsigned count)` : écrire jusqu'à 32 octets dans un registre
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `i2cOpen()`
  - Renvoie 0 si OK, sinon `PI_BAD_HANDLE`, `PI_BAD_PARAM` ou `PI_I2C_WRITE_FAILED`

Le bus I2C

Communication I2C avec `pigpio`

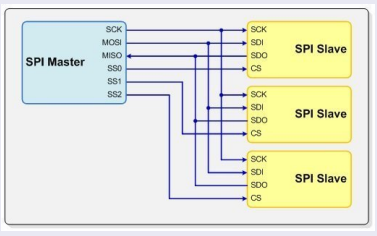
- Les fonctions de réception
  `int i2cReadByte(unsigned handle)` : lire un seul octet
  `int i2cReadDevice(unsigned handle, char *buf, unsigned count)` : lire jusqu'à 32 octets
  `int i2cReadByteData(unsigned handle, unsigned i2cReg)` : lire un seul octet depuis un registre
  `int i2cReadWordData(unsigned handle, unsigned i2cReg)` : lire un mot (16 bits) depuis un registre
  `int i2cReadI2CBlockData(unsigned handle, unsigned i2cReg, char *buf, unsigned count)` : lire jusqu'à 32 octets depuis un registre
  - `handle` : le handle `>=0` renvoyé par `i2cOpen()`
  - Renvoie >=0 si OK, sinon `PI_BAD_HANDLE`, `PI_BAD_PARAM` ou `PI_I2C_READ_FAILED`

Plan

L'interface SPI

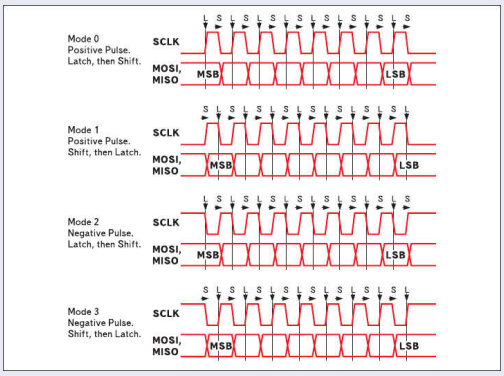
L'interface SPI

- SPI a été conçue par Motorola dans les années 1980
- SPI est une interface de communication en série synchrone et full-duplex
- SPI permet de mettre en communication un composant maître (généralement le microprocesseur) et plusieurs périphériques esclaves



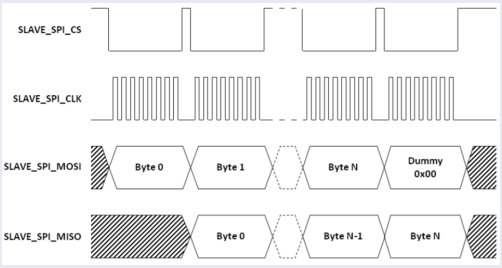
L'interface SPI

Modes de transmission avec SPI



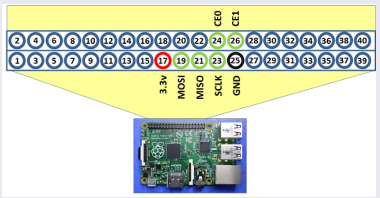
L'interface SPI

Transmissions des données



L'interface SPI sur la RPi3

Connexions SPI sur la RPi3



L'interface SPI sur la RPi3

Communication SPI avec `pigpio`

- `int spiOpen(unsigned spiChan, unsigned baud, unsigned spiFlags)` : initialiser la gestion de l'interface SPI
  - `spiChan` : 0-1 ; spécifier le canal. 2 pour un canal auxiliaire
  - `baud` : 32K-125M (valeur >30M ne fonctionnent pas)
  - `spiFlags` : les 22 bits du poids le plus faible spécifient les paramètres
  - Returns a handle (>=0) if OK, otherwise `PI_BAD_SPI_CHANNEL`, `PI_BAD_SPI_SPEED`, `PI_BAD_FLAGS`, `PI_NO_AUX_SPI` ou `PI_SPI_OPEN_FAILED`
- Structure de `spiFlags`

21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
b	b	b	b	b	b	R	T	n	n	n	n	W	A	u2	u1	u0	p2	p1	p0	m	m

1. `mm` : spécifie le mode de transmission SPI

Mode	POL	PHA
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

L'interface SPI sur la RPi3

Communication SPI avec `pigpio`

- Structure de `spiFlags`

21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
b	b	b	b	b	b	R	T	n	n	n	n	W	A	u2	u1	u0	p2	p1	p0	m	m

2. `px` : est 0 si `CEx` est actif à l'état bas (par défaut), et 1 pour l'état haut
3. `ux` : est 0 si la broche `CEx` est réservée pour SPI (par défaut), sinon 1
4. `A` : est 0 pour le périphérique standard SPI, 1 pour le SPI auxiliaire
5. `W` : is 0 if the device is not 3-wire, 1 if the device is 3-wire. Standard SPI device only.
6. `nnnn` : defines the number of bytes (0-15) to write before switching the MOSI line to MISO to read data. This field is ignored if `W` is not set. Standard SPI device only.
7. `T` : is 1 if the least significant bit is transmitted on MOSI first, the default (0) shifts the most significant bit out first. Auxiliary SPI device only.
8. `R` : is 1 if the least significant bit is received on MISO first, the default (0) receives the most significant bit first. Auxiliary SPI device only.
9. `bbbbbb` : defines the word size in bits (0-32). The default (0) sets 8 bits per word. Auxiliary SPI device only

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Questions ?