

SmartLED-displays

Barbara Ameloot

KU Leuven

barbara.ameloot@student.kuleuven.be

Wouter Jochems

KU Leuven

wouter.jochems@student.kuleuven.be

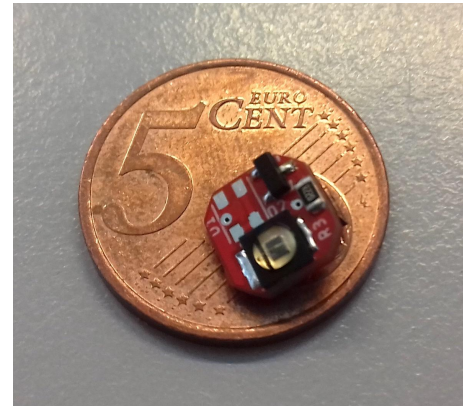
Abstract

Deze paper onderzoekt een mogelijke toepassing van SmartLEDs, LEDs aangestuurd door een microcontroller [Vandecauter and Veys, 2018]. Specifiek bestuderen we hun mogelijkheden op het gebied van LED-displays. LED-displays kennen veel toepassingen in verschillende gebieden, zoals marketing en entertainment. De fundamentele opbouw is vaak die van een centrale aansturing die het hele display bestuurt. Deze opbouw legt echter enkele beperkingen op en kan voor bepaalde problemen zorgen. We onderzoeken of een LED-display opgebouwd uit SmartLEDs, waarbij er geen centrale aansturing is, een meerwaarde biedt ten opzichte van de beperkingen die we bij de klassieke displays vaststellen. We evalueren de SmartLED-displays op hun flexibiliteit, hun interactiviteit en hun modulariteit. We concluderen dat, hoewel aan onze criteria wordt voldaan, SmartLED-displays niet altijd een goede vervanging zijn voor conventionele LED-displays. Ze bieden echter wel extra mogelijkheden voor meer experimentele LED-displays.

Keywords: SmartLED, VLC, LED, LED Display, Arduino, Microcontroller,

1 Introductie

LED-displays worden vaak gebruikt op evenementen en reclameborden. De huidige displays werken meestal met een centrale aansturing. Deze opbouw zorgt echter voor beperkingen bij het gebruik van de displays. Wij identificeren drie beperkingen waarvoor



Figuur 1: Een SmartLED

we onderzoeken of een SmartLED-display, zonder centrale aansturing, een meerwaarde kan bieden.

1. Een eerste punt is **flexibiliteit**. Er zijn reeds flexibele displays beschikbaar. Omdat elke led vanuit een centraal punt wordt aangestuurd is het nodig dat deze centrale controller kennis heeft van de positie van de LEDs. Dit zorgt ervoor dat de huidige flexibele displays beperkt zijn in hun bewegingsmogelijkheden. De individuele LEDs zijn vaak aangesloten op een raster of slinger om de relatieve positie van de LEDs ten opzichte van elkaar te behouden. Door de centrale controller weg te laten denken wij de nood aan het behouden van de relatieve posities te elimineren. Dit leidt tot meer mogelijkheden voor de dynamische flexibiliteit van een SmartLED-display.
2. Een tweede punt is **interactiviteit**. Ook hier zijn er reeds interactieve displays op de markt. Deze zijn echter vaak rigide. Door elke SmartLED van een eigen micro-controller te voorzien zorgen we ervoor dat deze zelf signalen van buitenaf kan verwerken. De individuele LEDs zijn bijgevolg

onafhankelijk van andere besturingselementen toch in staat om in interactie te treden met de buitenwereld. Voor deze interactie maken we gebruik van een lichtpen, dit is een SmartLED die een gebruiker op het display kan richten om zo signalen over te brengen aan de hand van infrarood licht.

3. Als derde en laatste punt bekijken we **modulariteit**. Zoals eerder vermeld is de flexibiliteit van de huidige displays beperkt. Doordat de LEDs vanuit n centraal punt worden aangestuurd zullen problemen bij de centrale controller een impact hebben op het hele display. Ook is het vaak moeilijk om een individuele LED of groepen van LEDs te vervangen wanneer deze niet meer werken. Door elke SmartLED als individuele entiteit te laten functioneren kunnen problemen zich niet voortplanten over het display. Omdat de SmartLEDs enkel afhankelijk zijn van zichzelf is het ook makkelijk om een enkele led te vervangen.



Figuur 2: Een LED-display met verbindingproblemen [Rick, 2017]

2 Verwant werk

Dit project is een rechtstreeks vervolg op het project van vorig jaar waarin de SmartLEDs ontwikkeld werden. [Vandecauter and Veys, 2018] Daarnaast is er al veel onderzoek gebeurd rond LEDs en hun mogelijk tot signaaloverdracht. Zo werd er al door ETH Zurich en Disney research onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van VLC, visual light communication, networks waarbij verschillende microcontrollers met elkaar communiceerden via LEDs [Schmid *et al.*, 2013]. Verder is er nog project firefly [Dix,] waarbij reeds een werkend display werd opgebouwd

van individueel aangestuurde LEDs maar deze waren nog steeds verbonden via een kabel.

3 Evaluatie

Het doel van ons onderzoek is nagaan of een display opgebouwd uit SmartLEDs een meerwaarde biedt ten opzichte van gewone displays. Hiervoor bekijken we de drie beperkingen die we vaststellen bij de klassieke displays: flexibiliteit, interactiviteit en modulariteit. Daarnaast onderzoeken we welke bijkomende beperkingen een SmartLED-display heeft.

Met **flexibiliteit** bedoelen we dat het mogelijk moet zijn om de SmartLEDs te verplaatsen zonder dat hiervoor code moet worden aangepast. Dit betekent dat de communicatie met en door de SmartLEDs onafhankelijk moeten werken van hun positie in het display.

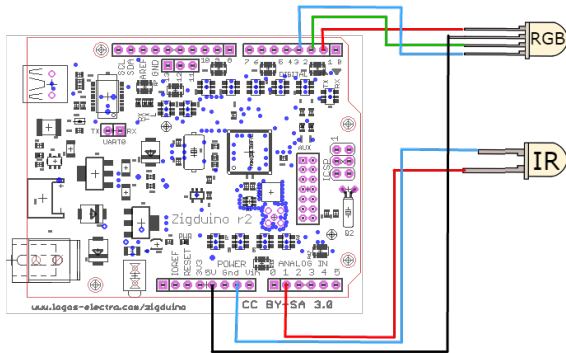
Voor de **interactie** willen we dat deze op een betrouwbare en interactieve manier gebeurt. Hiervoor maken we gebruik van een "lichtpen". Dit is een SmartLED voorzien van enkele knoppen om zo input door te sturen naar het display. Aan de hand van een floodlight, een lichtpen voorzien van meerdere, krachtigere LEDs, kunnen grotere groepen SmartLEDs aangestuurd worden. Het moet dus mogelijk zijn om aan de hand van een SmartLED een signaal te geven aan een andere SmartLED.

Voor **modulariteit** is het belangrijk dat er SmartLEDs kunnen worden toegevoegd en weggelaten zonder dat dit een invloed heeft op de rest van het display. Dit hangt nauw samen met de flexibiliteit. Waar we bij flexibiliteit vooral kijken naar de verplaatsbaarheid van LEDs, leggen we hier de focus op het toevoegen en weglaten van SmartLEDs. Hier is het vooral belangrijk dat het niet uitmaakt welke LEDs er deel uitmaken van het display.

4 Opstelling

De uiteindelijke implementatie zou gebruik maken van SmartLEDs. Om praktische redenen waren wij niet in staat deze te gebruiken tijdens ons onderzoek. Om onze hypothese te testen maken we gebruik van LEDs verbonden met Zigduino r2 microcontrollers. De Zigduinos bevatten een infrarood led en een RGB led. We kiezen ervoor om een infrarood led toe te voegen omdat dit de communicatie een stuk minder complex maakt. Indien we gebruik zouden maken van zichtbaar licht, zoals bij VLC, is het nodig om rekening te houden met het omgevingslicht. Dit verandert voortdurend en deze verandering moet in rekening

gebracht worden om onderscheidt te maken van een doelbewust signaal en het aanwezige omgevingslicht. De veranderingen in het aanwezige infrarood licht zijn veel minder uitgesproken. Dit laat ons toe om de threshold, de waarde vanaf wanneer we een signaal registreren, redelijk constant te houden. Om deze reden stappen we af van de pure VLC en kiezen we ervoor een extra infrarood LED toe te voegen.



Figuur 3: De opstelling voor de display SmartLEDs

5 Methode

Voor het schrijven van de code¹ gebruiken we de standaard Arduino IDE, aangepast om te werken met Zigduino's. De experimenten zijn gedaan met Zigduino r2 microcontrollers. Bij de applicaties beschreven in sectie 8 hebben we een pingpongbal over de LEDs geplaatst om het zichtbaar licht duidelijker te maken. Dit gaf geen hinder voor de communicatie.

We zoeken eerst een methode om signalen door te geven over verschillende SmartLEDs. Hiervoor baseren we ons op het werk van [Vandecauter and Veys, 2018]. Daarna bekijken we de mogelijkheden voor communicatie voor de voor ons 2 relevante aspecten: zijwaartse communicatie voor de LEDs in het display; en face-to-face voor interactie met een gebruiker.

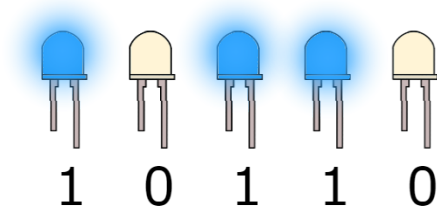
Ook bekijken we 2 manieren voor interactie met het display. De eerste manier werkt op een heel simpele manier en registreert slechts 1 soort input; er wordt een lichtpen op het display gericht. De tweede manier maakt gebruik van de signaloverdracht zoals die beschreven wordt; er wordt een bitstring overgedragen.

¹ Alle code is beschikbaar op <https://github.com/WoodyJo/SmartLED-displays>

6 Signaloverdracht

Voor de communicatie tussen SmartLEDs zijn we vertrokken vanuit VLC, visual light communication. Zoals [Schmid *et al.*, 2013] aantoonst is het mogelijk om LEDs te gebruiken om zowel licht uit te zenden als te ontvangen. Dit kan gebruikt worden voor communicatie tussen LEDs onderling zonder dat dit merkbaar is voor een gebruiker; de LED lijkt altijd aan, zo blijkt uit de paper. De communicatie verloopt grotendeels zoals beschreven in [Vandecauter and Veys, 2018]. Met als uitzondering de schakeling van de LED.

De signaloverdracht gebeurt aan de hand van infrarood licht. Een zender SmartLED zendt een bitstring uit via on-off keying. Hierbij wordt de binaire 1 voorgesteld door de LED aan te zetten en de 0 door de LED uit te zetten. Afhankelijk van de ontvangen bitstring zal de ontvanger de bijhorende reactie ondernemen. (zie figuur 4).



Figuur 4: on-off keying

6.1 Reverse Bias

We hebben gemerkt dat het verschil tussen de gemeten waarde wanneer we wel of niet op de LED schijnen veel groter is wanneer we de infrarood LED in **reverse bias** schakelden, in tegenstelling tot de forward bias zoals in [Vandecauter and Veys, 2018] gebruikt wordt. Dit vermoeden wordt bevestigd door de resultaten in tabel 1. Deze geeft telkens de waarden weer die door de Zigduino over de LED worden gemeten. Zoals beschreven in de Arduino Referentie [Ard,] bevat het bord een analog to digital converter. Deze mapt het input voltage op integer waarden tussen 0 en 1023. Bij de Zigduinos gebeurt dit op dezelfde manier. De tabel geeft een gemiddelde van 30 metingen van deze integer waarden zoals gemeten met de lichtbron op verschillende afstanden, alsook zonder de lichtbron.

Om het verschil tussen de forward bias en reverse bias te bevestigen bekijken we de waarden voor een afstand van 8 cm. Dit lijkt ons een representatieve afstand voor

Afstand tot lichtbron (in cm)	Reverse Bias gemeten waarde	Forward Bias gemeten waarde
4	0	425
6	3	418
8	10	416
10	24	413
15	330	405
20	380	397
30	515	388
Geen extra lichtbron	722	388

Tabel 1: Gemeten waarden over LED

de communicatie met de lichtpen. We bekijken het absolute verschil tussen de waarden met en de waarden zonder lichtbron. Voor de forward bias zien we een absoluut verschil van 27. Dit bedraagt slechts 6,96% van de standaardwaarde zonder licht. Voor de reverse bias zien we een absoluut verschil van 712, ofwel 98,6% van de standaardwaarde zonder licht. Door het grote verschil in waarde is het makkelijker om te registreren wanneer er effectief een signaal naar de LED wordt gestuurd in plaats van eventuele ruis. We plaatsen de infrarood LED dus in reverse bias.

6.2 Synchronisatie

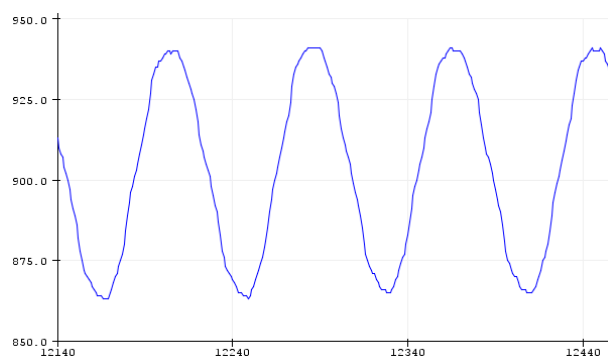
Voor de **synchronisatie** maken we gebruik van oversampling, zoals beschreven in de paper. Dit houdt in dat we voor elke bit meerdere lezingen uitvoeren, namelijk 3. Door de metingen met elkaar te vergelijken kunnen onverwachte veranderingen worden opgespoord. Hieruit kan worden afgeleid of de lezer voor of achterloopt op de zender. Om ervoor te zorgen dat de juiste bitstring gelezen wordt, zal de lezer de fout corrigeren door de laatste meting van de vorige bit over te brengen naar de volgende. Voor de volgende bit worden dan maar 2 bijkomende metingen gedaan.

Om het begin van de bitstring aan te geven gebruiken we een preamble. Deze bestaat simpelweg uit drie eenen gevolgd door een nul. De ontvanger controleert of hij deze preamble ontvangt en indien dit het geval is, begint hij de bitstring te registreren.

6.3 Threshold

Om ervoor te zorgen dat de SmartLEDs een verschil zien tussen omgevingslicht en een signaal moeten we

een threshold, een waarde vanaf wanneer we een meeting als input beschouwen, instellen. Omdat we gebruik maken van infraroodlicht blijft de waarde van de threshold redelijk constant. We merken echter wel verschillen in de gemeten basiswaarde afhankelijk van het gebruikte Zigduino-bord en eventuele storingsbronnen. Hierdoor is het nodig om op regelmatige tijdstippen de waarde van de threshold bij te sturen. Wanneer we de gemeten waarde zonder lichtinput plotten krijgen we een duidelijk sinusodale verloop zoals te zien op figuur 5. Dit valt te verklaren door de RC-kringen in de gebruikte zigduinos die als oscillator werken. [osc,]



Figuur 5: De gedetecteerde ruis, gemeten spanning in functie van de tijd

Om de gemeten waarde van het omgevingslicht nauwkeuriger te maken besloten we om deze gelijk te stellen aan het gemiddelde van tien metingen met telkens 50ms (ongeveer de helft van een periode) tussen om het sinusoidale verloop op te vangen. Hierbij tellen we een waarde op, die groter is dan de amplitude van de sinus golf, en bekomen zo onze threshold. Voor ons onderzoek volstaat het om de threshold te bepalen wanneer de SmartLED wordt geactiveerd of een nieuw programma wordt uitgevoerd.

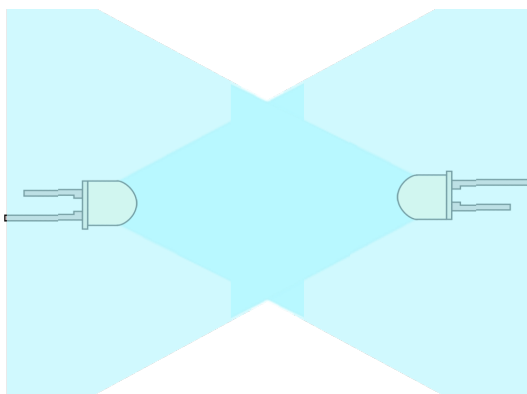
7 Communicatie

7.1 Face-to-face Communicatie

Wanneer we twee SmartLEDs naar elkaar richten (zoals in figuur 6), kunnen we aan de hand van de eerder beschreven technieken een bitstring verzenden. Dit kunnen we gebruiken om via een lichtpen, een SmartLED die voorzien is van besturingsknoppen, een signaal door te sturen naar de andere SmartLEDs.

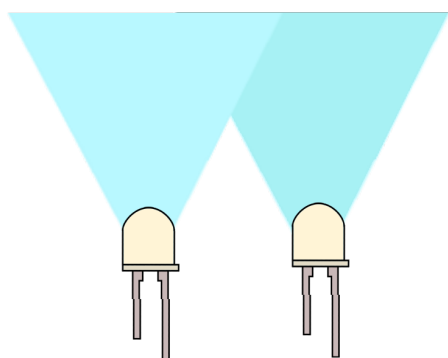
7.2 Zijwaartse Communicatie

Om de LEDs als één display te laten werken, zoeken we een manier om een signaal door te geven tussen de



Figuur 6: Stralingshoek bij Face-to-Face gepositioneerde LEDs

LEDs. Hiervoor wilden we aanvankelijk gebruik maken van de aanwezige infrarood LED. We zijn er echter niet in geslaagd om een zijdelings signaal door te geven indien de LEDs beiden naar boven wijzen. Dit is te verklaren door de beperkte stralingshoek van de LED, zoals geïllustreerd in figuur 7.



Figuur 7: Stralingshoek bij zijdelings gepositioneerde LEDs

Een mogelijke oplossing hiervoor zou het gebruiken van een diffuser kunnen zijn om zo een grotere stralingshoek te bekomen. Wij hebben dit in onze opstelling getest aan de hand van een pingpong bal. Dit bleek in ons geval echter niet voldoende om de zijwaartse communicatie te doen slagen. Door een krachtigere LED te gebruiken, d.w.z. een die meer lumen produceert, zou dit mogelijk toch een oplossing kunnen zijn. Dit hebben wij niet verder onderzocht.

Een andere mogelijkheid zou zijn om dit op te lossen door extra infrarood LEDs te monteren die naar de buitenkant gericht zijn, in plaats van naar boven. Wij hebben er echter voor gekozen dit niet te doen omdat we

de SmartLEDs zo eenvoudig mogelijk wilden houden.

Deze keuze resulteert echter wel in een beperking voor eventuele toepassingen van het display:

Er is geen zijwaartse communicatie tussen de individuele SmartLEDs.

Om de LEDs toch als 1 geheel te laten werken stellen wij een systeem voor dat gebruik maakt van een floodlight. Dit is een SmartLED die is uitgerust van meerdere infrarood LEDs zodat deze in staat is om over een groter oppervlak te schijnen. Dit maakt het mogelijk om de display-SmartLEDs te synchroniseren en gelijktijdig een bepaald programma te laten starten. Omdat de LEDs zonder onderlinge communicatie waarschijnlijk niet perfect synchroon zullen blijven, is het nodig hier rekening mee te houden bij de keuze van de toepassing.

7.3 Meerdere LEDs

Bij aanvang van ons project hoopten we voor het display en het verzenden van informatie dezelfde LED te gebruiken. Dit is niet alleen compact, maar het zorgt er ook voor dat we de SmartLED niet moeten uitbreiden met extra hardware. We hebben echter besloten om een tweede LED, namelijk een infrarood LED, te gebruiken omdat dit de communicatie een stuk eenvoudiger laat verlopen zoals beschreven bij de threshold.

Om visuele redenen hebben we ervoor gekozen om als display-LED een RGB LED te gebruiken. Dit laat ons toe om via één enkele LED meer te variëren in de informatie die we kunnen overbrengen naar de gebruiker. Zo zijn kleuren in staat om emotionele reacties op te wekken [Valdez and Mehrabian, 1994]. Omdat we voor een SmartLED display vooral een toepassing zien in marketing en entertainment vinden we de hogere kost van een RGB LED verantwoord. Kleuren spelen een belangrijk instrument in marketing [Labrecque and Milne, 2011].

8 Interactie

Zoals eerder vermeld maken we voor de interactie met het display gebruik van een lichtpen. Deze interactie kan op twee manieren verlopen. De eerste manier maakt gebruik van een heel simpele aanpak. Hierbij kijkt het display enkel naar de aan- of afwezigheid van een signaal. Dit noemen wij de "Naïve Methode". Voor de tweede manier maken we gebruik van de communicatiemethode zoals eerder beschreven (in sectie 7). Deze methode noemen wij de "Bitstring Methode".

8.1 Naïve Methode

Voor de naïve methode is er geen nood aan de synchronisatie zoals beschreven in 6.2. De display-SmartLEDs registreren elke waarde die de threshold overschrijdt al input. Deze vorm van communicatie stelt ons al in staat enkele simpele toepassingen te implementeren.

Verfborstel

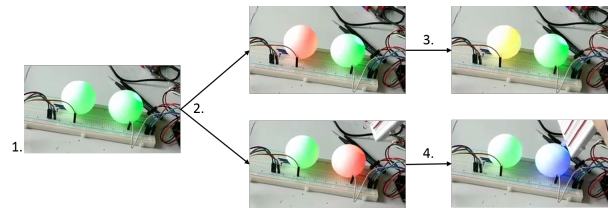
Een eerste toepassing is een verfborstel applicatie. Deze vorm van interactie is volledig afhankelijk van de input van de gebruiker; de SmartLEDs nemen zelf geen initiatief.

Bij de start van het programma staan de display-LEDs op wit. Wanneer de lichtpen voorbij komt veranderen ze van kleur, naar blauw. Deze kleur houden ze enkele seconden aan waarna ze weer naar wit overschakelen. Wanneer we meerdere display-LEDs naast elkaar zetten zijn we in staat een groter canvas te maken. Door de aard van de toepassing is het niet nodig om synchronisatie te voorzien tussen de individuele SmartLEDs. Voor de gebruiker werkt het canvas als één geheel.

Whack-a-Mole

Voor een tweede toepassing met de naïve methode wilden we de interactiemogelijkheden testen met behulp van een interactief spel. Hierbij nemen de SmartLEDs wel initiatief en wordt hun volgende actie bepaald afhankelijk van de actie van de gebruiker.

We kozen hier voor een variant op "Whack-a-Mole" (zie figuur 8). Hier staan de display-LEDs bij de start van het programma op groen. Na een willekeurig bepaalde tijd veranderen ze van kleur, naar rood, om aan te geven dat de gebruiker actie moet ondernemen. Indien de gebruiker de lichtpen op de display-LED richt zal deze de input registreren en even overgaan naar blauw om aan te geven dat de rode LED succesvol is uitgeschakeld. Indien er binnen de twee seconden geen input wordt geregistreerd betekent dit dat de rode LED niet is uitgeschakeld en zal de display-LED dit aangeven door oranje te knipperen. Ook hier is er geen nood aan synchronisatie, de willekeurige aard van het spel laat toe om de individuele Smart-LEDs als een gesimuleerd geheel te laten werken voor de gebruiker.



Figuur 8: Whack-a-Mole; 1: inactief, 2: vraagt om respons, 3: geen respons, 4: wel respons

8.2 Bitstring Methode

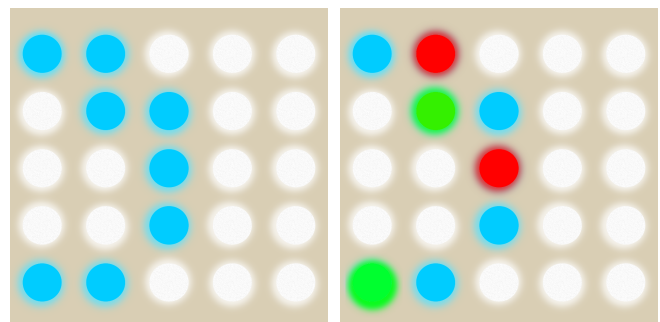
Bij de bitstring methode hebben de lichtpen voorzien van drie knoppen. Deze knoppen hebben elk hun eigen unieke bistring. Dit laat ons toe om meer interactiemogelijkheden te gebruiken bij de implementatie.

Verfborstel 2

We hebben de verfborstel applicatie uitgebreid met deze nieuwe mogelijkheden. Elke knop komt nu overeen met een kleur: rood, groen en blauw. Wanneer de gebruiker een knop indrukt zal de display-LED de overeenkomstige kleur aannemen. Na enkele seconden wordt de LED terug wit. Ook is het mogelijk om aan een combinatie van knoppen een bitstring toe te kennen. Zo kunnen meerdere kleuren bekomen worden.

Bij de tweede manier wordt er een bit-string verzonden naar het display. Deze manier hebben we getest met een programma waarbij een bit-string gelijk werd gesteld aan een kleur die de display LED moest aannemen of aan een programma dat afgespeeld moest worden.

Ook deze applicatie laat toe om het display als één geheel te gebruiken, zonder dat hier synchronisatie voor nodig is.



(a) Naïve implementatie van de verfborstel (b) Bitstring implementatie van de verfborstel

Programma selecteren

Het is mogelijk om de knoppen een functie te geven buiten de applicatie, bijvoorbeeld om een andere

applicatie te selecteren. Zo kan 1 knop gebruikt worden om de SmartLEDs in een selectie toestand te brengen. Vanuit deze toestand wachten de display-LEDs op een input om over te schakelen naar het volgende programma. Indien de lichtpen voorzien is van een groter bereik (door meerdere infrarood-LEDs te monteren), zou het mogelijk moeten zijn om de display-LEDs gelijktijdig met een ander programma te laten starten. De synchronisatie zal hier waarschijnlijk niet perfect zijn. Dit is iets waar bij het schrijven van toepassingen rekening moet worden gehouden.

9 Conclusie

We bekijken voor elk van de drie criteria of de SmartLEDs hier geschikt voor zijn en evalueren de andere gevolgen van een SmartLED-display.

9.1 Evaluatiecriteria

Flexibiliteit

Er is geen zijwaartse communicatie tussen de SmartLEDs. Dit zorgt ervoor dat het niet nodig is dat de SmartLEDs op een vaste positie relatief ten opzichte van elkaar staan. Ook verloopt de communicatie onafhankelijk van omgevingsfactoren zoals licht. Het is dus mogelijk om de SmartLED te verplaatsen terwijl het programma loopt. Hieruit besluiten we dat een display opgebouwd uit SmartLEDs voldoet aan onze flexibiliteitscriteria.

Interactie

De interactie met het display gebeurt aan de hand van een lichtpen voorzien van knoppen. We zijn in staat om verschillende signalen naar het display te sturen en hier visuele feedback vanuit het display op te geven. Door de knoppen te voorzien van bijvoorbeeld gekleurde stickers is de communicatie heel intuïtief; er is weinig of geen uitleg nodig voor een gebruiker om met het display te communiceren. Hieruit besluiten we dat het display voldoet aan onze interactie criteria.

Modulariteit

De SmartLEDs kunnen een gesimuleerd geheel vormen zonder dat het uitmaakt welke LEDs deel uitmaken van het display. Hierdoor is het mogelijk om SmartLEDs weg te halen of toe te voegen, mist deze dezelfde applicatie uitvoeren. Ede SmartLEDs zijn onafhankelijk van elkaar. Indien er een SmartLED defect is zal dit zich beperken tot de individuele LED en niet verspreiden over het display. We besluiten dan het SmartLED-display voldoet aan onze modulariteitscriteria.

9.2 Beperkingen

De manier waarop we het display samenstellen legt enkele beperkingen op wat betreft de mogelijke toepassingen. Het is niet mogelijk om een signaal door te geven in het display; alle SmartLEDs zijn afhankelijk van eigen initiatief of input van de gebruiker. Dit laat niet toe om het SmartLED-display te gebruiken zoals een conventioneel display.

Daarnaast is ook de resolutie van het display beperkt. De grote van de SmartLEDs laat niet toe om de resolutie van een conventioneel display te benaderen. Wanneer uitgerust met een pingpongbal-diffuser hebben de LEDs een doorsnede van 3.7cm. Hierdoor zijn ze niet geschikt voor gedetailleerde weergaves maar eerder voor globale vormen op grotere afstand.

10 Verder werk

Als vervolg op dit project zou een display opgebouwd uit echte SmartLEDs (in plaats van de door ons gebruikte Zigduino's) gemaakt kunnen worden. Het zou ook interessant zijn om de mogelijkheden voor zijwaartse communicatie tussen de displayLEDs verder te onderzoeken. Ook zijn er andere applicaties mogelijk waarbij de flexibiliteit van het display verder benut wordt.

Referenties

- [Ard,] `analogread()`. <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>. Geraadpleegd: 2019-05-08.
- [Dix,] A. Dix. Firefly. <https://alandix.com/academic/projects/firefly/>.
- [Labrecque and Milne, 2011] L. Labrecque and G. Milne. Exciting red and competent blue: the importance of color in marketing, 2011.
- [osc,] Rc-oscillator. <https://nl.wikipedia.org/wiki/RC-oscillator>. Geraadpleegd: 2019-05-08.
- [Rick, 2017] Rick. How to fix led display problem - part of the panels appear black. https://www.szptcled.com/post_id_38.html, 2017.
- [Schmid *et al.*, 2013] S. Schmid, S. Mangold, G. Corbellini, and T.R. Gross. Led-to-led visible light communication networks, 2013.
- [Valdez and Mehrabian, 1994] P. Valdez and A. Mehrabian. Effects of color on emotions, 1994.

[Vandecauter and Veys, 2018] M. Vandecauter and B. Veys. Flicrr: Friendly led integrated & compact radio replacement, 2018.