





Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000 Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763 Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ІІНТЕГРПСАНІІ СПСТЕМ МЕНАЦМЕНТА СЕРТИФІІКОВАН ОД:



PROJEKAT IZ PREDMETA PRIMENJENA OPTOELEKTRONIKA

NAZIV PROJEKTA:

Realizacija kolorimetra

TEKST ZADATKA:

- 1. Očitati podatke sa senzora color 6 click, putem I2C komunikacije.
- 2. Date podatke obraditi i ispisati na displeju i omogućiti podešavanje načina rada senzora.
- 3. Na osnovu podataka prikazati boju koju senzor očitava.

MENTORI PROJEKTA:

profesor Jovan Bajić

asistent Milan Božić

PROJEKAT IZRADIO:

Lazar Vučković EE164/2014

Miloš Jovanović E1 78/2019

DATUM ODBRANE:

Sadržaj

1. Uvod	4
2. Kolorimetrija	5
2.1. Vidljiv spektar elektromagnetnog zračenja	5
2.2. Karakteristike ljudskog oka	6
2.3. Prostori boja nezavisni od uređaja	7
2.4. Značenje X,Y i Z vrednosti i CIE 1931 XYZ standard	8
2.5. Normalizovane koordinate i hromatski dijagram	9
3. Kolorimetar	.11
4. Komponente korišćene za realizaciju kolorimetra	.12
4.1. Color 6 click pločica	.12
4.1.1. Senzor boje AS73211	.13
4.1.2. Način rada senzora AS73211	.14
4.2. Razvojni sistem mikromedia Plus for STM32F7	.15
5. Realizacija kolorimetra	.16
5.1. Konfiguracija pinova kontrolera	.16
5.2. Pisanje izvršnog programa	.17
5.2.1. Algoritam rada	.18
6. Izgled gotovog uređaja	.22
7. Zaključak	.24
8. Literatura	.25
Dodatak A	.26

Skraćenice

- CIE Commission internationale de l'éclairage (međunarodna organizacija za osvetljenje)
- SML Short, Medium, Long wavelenght
- D65 Međunarodni (CIE) standard za temperaturu boje koje zrači crno telo na 6500 K.
- D50 Međunarodni (CIE) standard za temperaturu boje koje zrači crno telo na 5000 K.
- (O)LED (Organic) Light Emitting Diode
- I2C Inter-Integrated Circuit standard za komunikaciju između dva ili više uređaja
- SDA Serial Data Line
- SCL Serial Clock Line
- ADC Analog to Digital Converter
- OSR Operational State Register

1. Uvod

Zadatak ovog projekta je da se realizuje kolorimetar pomoću senzora boje, koji se nalazi na Color 6 pločici i Mikromedia Plus for STM32F7 razvojnog sistema. Senzor koji se nalazi na pločici prima informaciju o boji i putem I2C komunikacije šalje podatke na razvojni sistem, gde se podaci obrađuju i prikazuju na displeju. Takođe pored brojevnih vrednosti očitanih sa senzora, potrebno je napraviti vizuelnu reprezentaciju boje u vidu hromatskog dijagrama.

Kolorimetri su u stvari senzori boje. To su uređaji koji primaju informaciju o boji i konvertuju je u brojnu vrednost. Na ovaj način moguće je imati preciznu informaciju o boji koja se očitava, tj. o njenim hromatskim koordinatama. Iz ovog razloga su kolorimetri korisni uređaji koji imaju razne primene, kao npr. za regulisanje osvetljenja pomoću RGB LED dioda, u grafičkoj industriji, za kalibraciju monitora i mnoge druge.

Kako bi se ovaj projekat uspešno realizovao, potrebno je poznavati osnovne teorije o bojama tj. kolorimetriji, pa će iz tog razloga u nastavku biti objašnjeni načini na koji čovek percipira boje i kako se to sve može pretvoriti u brojevne vrednosti.

2. Kolorimetrija

Kolorimetrija je nauka o bojama, tačnije nauka koja se bavi istraživanjem, proučavanjem i opisivanjem načina na koji čovek percipira boje. Zanimljivo je da prosečan čovek, prema nekim procenama, može da razlikuje i do deset miliona boja. Iako je način na koji čovek percipira određenu boju subjektivan osećaj posmatrača, 1931. godine CIE (međunarodna komisija za osvetljenje) je donela prve standarde koji su usvojeni u vezi sa bojom i svetlom.

2.1. Vidljiv spektar elektromagnetnog zračenja

Boja je osećaj koji predstavlja odgovor čovekovog vizuelnog sistema na pobudu u vidu elektromagnetnog zračenja, poznatog kao svetlost. Ono što mi nazivamo svetlost odnosi se na spektar vidljivog elektromagnetnog zračenja, a to je opseg 380 nm – 760 nm. Po frekvenciji, to odgovara opsegu u blizini 430–770 THz. Elektromagnetno zračenje u ovom opsegu se naziva vidljiva svetlost ili jednostavno svetlost. Spektar ne sadrži sve boje koje ljudske oči i mozak mogu razlikovati. Na primer, nezasićene boje kao što su ružičasta, ili varijacije ljubičaste poput magente nedostaju, jer se mogu načiniti samo iz mešavine više talasnih dužina. Boje koje sadrže samo jednu talasnu dužinu se nazivaju čistim bojama ili spektralnim bojama. Na *slici 1* se može uočiti vidljivi spektar elektromagnetnog zračenja, kao i područje talasnih dužina koje ljudsko oko percipira kao određenu boju.

8	V ₿ B ₿ G	월 ⋎ 월 0월 R	f
Boja	Talasna dužina	Frekvencija	Energija fotona
Ljubičata	380–450 nm	680–790 THz	2.95-3.10 eV
Plava	450– <mark>4</mark> 85 nm	620-680 THz	2.64-2.75 eV
Cijan	485–500 nm	600–620 THz	2.48-2.52 eV
Zelena	500–565 nm	530–600 THz	2.25-2.34 eV
Žuta	565–590 nm	510-530 THz	2.10-2.17 eV
Narandžasta	590–625 nm	480–510 THz	2.00-2.10 eV
Crvena	625–740 nm	405–480 THz	1.65-2.00 eV

Slika 1 – Vidljiv spektar elektromagnetnog zračenja

2.2. Karakteristike ljudskog oka

Ćelije koje učestvuju u građi ljudskog oka se nazivaju fotoreceptori i oni nam omogućavaju vid. Fotoreceptori su specijalizovani neuroni koji su osetljivi na svetlost i sposobni da pretvaraju svetlosnu energiju u električne impulse. Kod ljudskog oka postoje dva tipa fotoreceptora, a to su štapićaste ćelije ("štapići") i kupaste ćelije (poznatije kao "čepići"). Štapićaste ćelije omogućavaju periferni i noćni vid, ali ne reaguju na boje. Čepići omogućavaju centralni oštri vid, kao i razlikovanje boja. Kod ljudi štapićaste ćelije su gušće raspoređene na periferiji, a čepići u središnjem delu mrežnjače. Oko čoveka sadrži 6 do 7 miliona čepića. Približno 65% čepića je osetljivo na crvenu svetlost, 33% na zelenu i samo oko 2% na plavu svetlost, međutim čepići koji reaguju na plavu svetlost su ujedno i najosetljiviji. Uobičajeno je da se pomenute tri vrste čepića obeležavaju kao S (eng. Short-wavelength-sensitive cones), M (eng. Medium-wavelength-sensitive cones) i L (eng. Long-wavelength-sensitive cones) čepići. Na *slici 2* se može videti građa ljudskog oka i raspored čepića koji odgovaraju različitim talasnim dužinama svetlosti.



Slika 2 – Građa ljudskog oka (levo) i normalizovane spektralne karakteristike čepića

Kako postoje tri vrste čepića, može se zaključiti da se svaka boja može opisati vektorom koji sadrži tri komponente. Pomenute tri komponente boje mogu biti definisane na više različitih načina što dovodi i do formiranja različitih prostora boja. Prostori boja se mogu svrstati u tri kategorije:

- 1. Prostori boja orijentisani ka uređajima
- 2. Korisnički orijentisani prostori boja
- 3. Prostori boja nezavisni od uređaja.

Za potrebe ovog projekta od značaja je samo poslednji, a to je prostor boja nezavisan od uređaja. To je najpribližniji opis boje na način na koji ljudsko oko može da ih vidi.

2.3. Prostori boja nezavisni od uređaja

Iako bi se moglo smatrati da su spektralne krive čepića same po sebi dovoljne da se opiše data boja, to nije usvojeno kao standard, zbog toga što ove krive nisu poznate sa dovoljnom preciznošću. Umesto toga, izabrana osnova bila je trobojno (trihromatsko) usklađivanje ili podudaranje.

Kao što je već napomenuto 1931. godine CIE komisija je definisala standardnog posmatrača i usvojila spektralne krive podudaranja boje definisane upravo za standardnog posmatrača. Eksperiment je izveden tako što je sa jedne strane zaslona projektovana referentna boja, dok se na drugoj strani istovremeno projektuje svetlost tri podesiva svetlosna izvora koja grubo govoreći odgovaraju crvenoj, zelenoj i plavoj svetlosti. Posmatrač je posmatrao projektovanu svetlost pod uglom od 2°, gde je bilo potrebno podešavanjem tri izvora svetlosti dobiti referentnu boju sa druge strane zaslona. U svakom koraku eksperimenta beležila se talasna dužina referentne boje i intenziteti tri primarne boje (podesivih izvora svetlosti) potrebni za podudaranje referentne i podesive boje. Kao krajnji rezultat dobijene su krive podudaranja boje rgb i mogu se videti na *slici 3 (levo)*.



Slika 3 – Krive podudaranja boje CIE 1931 RGB (levo) i CIE 1931 XYZ (desno)

Vertikalna osa opisuje koliki je relativni intenzitet svakog od primarnih izvora, kako bi se pomoću njih dobila referentna boja talasne dužine sa horizontalne ose. Ove krive su kasnije iskorišćene za definisanje međunarodnog standarda za prostor boja CIE 1931 RGB, međutim kao što se sa slike može videti krive podudaranja rbg imaju i negativne vrednosti. U to vreme je smatrano da sistem kao takav može dovesti do greške prilikom tumačenja negativnih vrednosti. Kako bi se to izbeglo, smatrano je da je tristimulusne vrednosti R, G, B, nastale iz krivih podudaranja rgb bilo potrebno zameniti sa novim vrednostima X, Y, Z. Krive koje definišu rgb prostor boja su pomnožene pažljivo odabranim konstantama kako bi se izbegle negativne vrednosti i to se može videti iz sledećih jednačina:

$$\bar{x}(\lambda) = 0.49 \,\bar{r}(\lambda) + 0.31 \,\bar{g}(\lambda) + 0.20 \,\bar{b}(\lambda) \tag{1}$$

$$\bar{y}(\lambda) = 0.17697 \,\bar{r}(\lambda) + 0.81240 \,\bar{g}(\lambda) + 0.01063 \,\bar{b}(\lambda) \tag{2}$$

$$\bar{z}(\lambda) = 0.00 \,\bar{r}(\lambda) + 0.01 \,\bar{g}(\lambda) + 0.99 \,\bar{b}(\lambda) \tag{3}$$

7

Tako su dobijene krive podudaranja boja, gde su sve vrednosti pozitivne (*slika 3 – desno*). Primenom ovih krivih spektralna raspodela snage spoljašnje pobude $C(\lambda)$ (izvor svetlosti koji pada na mrežnjaču ljudskog oka) može se transformisati u tri brojčane vrednosti X, Y i Z koje opisuju boju pobude:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$
⁽⁴⁾

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$
⁽⁵⁾

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$
⁽⁶⁾

2.4. Značenje X,Y i Z vrednosti i CIE 1931 XYZ standard

Svetlost koja potiče iz zelenog spektra ljudsko oko percipira kao da je svetlije u odnosu na svetlost koja dolazi iz crvenog i plavog spektra iste snage. Funkcija sjajnosti koja opisuje percepciju sjajnosti boje na različitim talasnim dužinama praktično odgovara spektralnoj osetljivosti čepića na zelenu svetlost (Mediumwavelength-sensitive cones), što se može videti na *slici 4*.



Slika 4 – Upoređivanje normalizovanog odziva čepića na zelenu svetlost i krive $\bar{y}(\lambda)$

Zahvaljujući ovoj činjenici CIE komisija je proglasila da Y vrednost označava sjajnost boje. Vrednosti X i Z su kvazianalogni crvenoj odnosno plavoj boji respektivno. Iz ovoga proizilazi da za bilo koju Y vrednost, pomoću X i Z se mogu definisati sve boje koje se mogu dobiti sa tim intenzitetom sjajnosti. Dakle tristimulusne vrednosti XYZ su analogne spektralnim krivim ljudskog oka (SML), ali ne i jednake.

Odgovarajući prostor boja koji se formira pomoću X, Y i Z vrednosti naziva se CIE XYZ prostor boja i usvojen je kao međunarodni standard pod nazivom CIE 1931 XYZ. Ovakav prostor boja predstavlja kolorimetrijski prostor boja nezavisan od uređaja i koristi se u primenama gde je važna dosledna predstava boje.

2.5. Normalizovane koordinate i hromatski dijagram

Normalizacijom X, Y i Z vrednosti dobijaju se tzv. koordinate hromatičnosti ili hromatske koordinate, što se može dobiti primenom sledećih jednačina:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \tag{7}$$

$$y = \frac{1}{X + Y + Z} \tag{6}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \tag{9}$$

Koordinata z se može dobiti i iz izraza: z = 1 - (x + y), pa je za opis boje dovoljno poznavati x, y i Y. Koordinate x i y nazivaju se hromatskim koordinatama i opsuju boju u smislu tona boje (crvena, zelena, plava) i zasićenosti (sadržaj bele boje u datoj boji). Treći parameter Y opisuje sjajnost. Na ovaj način dobija se CIE xyY prostor boja koji je veoma korišćen za opisivanje boje u praksi.

Poznavanjem ovih koordinata moguće je projektovati trodimenzionalni prostor boja CIE XYZ u ravan xy, koja se naziva hromatski dijagram prikazan na *slici 5*. Na dijagramu se nalaze sve boje koje prosečan čovek može da razlikuje.



Slika 5 – Hromatski dijagram

Obod dijagrama se naziva spektralni lokus i odgovara monohromatskoj svetlosti na datim talasnim dužinama. To znači da se svaka tačka koja se nalazi na obodu dijagrama može dobiti iz izvora svetlosti tačno određene talasne dužine. Boja dobijena superpozicijom dva različita izvora svetlosti unutar dijagrama se mora nalaziti na pravoj koja prolazi kroz dve tačke pomenutih izvora. Sve moguće boje dobijene mešanjem ta dva izvora svetlosti nalaziće se na datoj pravoj. Ovo je korisno prilikom aditivnog mešanja boja. Ukoliko se za mešanje koriste tri boje prilikom aditivnog mešanja, kada se povuku prave između svake tačke dobiće se trougao. Svaka boja koja se nalazi unutar trougla se može dobiti mešanjem date tri boje. Ovaj trougao se naziva opseg boja ili gamut.

Određivanje opsega boja nekog uređaja veoma je bitno jer se na taj način mogu videti ograničenja uređaja u smislu reprodukcije boja. Tako npr. monitori koriste RGB prostor boja, a ako se gamuti na dva različita monitora ne podudaraju, to znači da reprezentacija određenih boja neće biti verna, tj. neće biti ista na oba monitora.

3. Kolorimetar

Kolorimetri su u stvari senzori boje. To su uređaji koji objektivno upoređuju boje, ispituju tolerancije u reprodukciji pojedinih boja u štampi, mogu da se koriste pri kalibraciji uređaja (monitora). Za razliku od ostalih uređaja, denziometra i spektrofotometra, kolorimetar je uređaj koji meri tristimulusne vrednosti X, Y, Z.

Prilikom očitavanja boje potrebno je koristiti svetlosni izvor (D65 ili D50 u zavisnosti od senzora), kako bi se obojena površina osvetlila. Odbijena svetlost od uzorka prolazi kroz sočivo senzora, na kome su ugrađeni filteri crvene, zelene i plave svetlosti, koji oponašaju $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ i $z(\lambda)$ spektralne krive podudaranja boja standrdnog posmatrača. Iza filtera nalaze se fotodetektori, koji detektuju svetlost koja je prošla kroz filter i pretvaraju je u električni signal. Ovi signali se predstavljaju kao X, Y i Z vrednosti date boje. Na *slici 6* se može videti način rada kolorimetra.



Slika 6 – Način rada kolorimetra

Mana ovog senzora je uravo ta što je potreban standardizovan izvor svetlosti kako bi se nijansa boje verno reprezentovala. Zbog toga je nemoguće precizno uporediti dve nijanse boje osvetljene sa različitim svetlosnim izvorom.

Cilj ovog projekta je da se realizuje jedan ovakav senzor uz pomoć dostupnih komponenata. Kolorimetri nalaze široku primenu u raznim aplikacijama, poput:

- Kontroli LED osvetljenja
- Detekciju i korekciju ambijentalnog osvetljenja
- Kompenzaciju starenja (O)LED displeja i balansiranje dinamičkih displeja
- Prenosivi merač boje
- Fotometriji za određivanje koordinata boje, kao i njene sjajnosti.

4. Komponente korišćene za realizaciju kolorimetra

Uz pomoć komercijalno dostupnih komponenata potrebno je napraviti senzor boje – kolorimetar. Konstruisan uređaj se sastoji od senzora boje integrisanog na Color 6 click pločici od kompanije Mikroelektronika, kao i razvojnog sistema Mikromedia Plus for STM32F7 iste kompanije. Boja se očitava pomoću pomenutog senzora, dok se podaci obrađuju pomoću razvojnog sistema, a očitane vrednosti se ispisuju na displeju, kao i vizuelni prikaz posmatrane boje.

4.1. Color 6 click pločica

Color 6 click pločica poseduje veoma precizan i integrisan senzor boje oznake AS73211. Ovaj senzor boje je u suštini kolorimetar koji na svom izlazu daje X, Y i Z vrednosti, koje odgovaraju CIE 1931 XYZ prostoru boja.

Pločica je konstruisana tako da ima izvedene priključke za napajanje, masu (analognu i digitalnu), kao i SDA i SCL korišćene prilikom I2C komunikacije. Senzor je preporučljivo napajati DC naponom od 3,3 V. Podešavanje načina rada i očitavanje podataka senzora se vrši pomoću I2C protokola. Ovaj vid komunikacije zahteva i pull – up otpornike koji su neophodni kako bi dva uređaja mogla da komuniciraju. Iz tog razloga se na pločici već nalaze takvi otpornici od 820 Ω , kako se i zahteva po datasheetu proizvođača senzora. Pored ovoga ugrađen je i LED dioda, kao indikacija prisutnosti napona napajanja. Na *slici* 7 se može videti izgled Color 6 click pločice.



Slika 7 – izgled senzorske pločice Color 6 click

4.1.1. Senzor boje AS73211

Senzor poseduje tri kanala za konverziju svetla pomoću fotodioda u električni signal. Ispred sve tri fotodiode nalaze se optički filtri kako bi se dobile tristimulusne vrednosti. Takav signal se vodi na 24 - bitni ADC senzora i pretvara u digitalnu X, Y i Z vrednost, baziranu na krivama podudaranja CIE 1931 (*slika 3 – desno*). Svaki kanal ima svoj zasebni 16 - bitni registar u koji se upisuje dobijena digitalna vrednost, a pomeranjem (šiftovanjem) bita se može postići puna rezolucija AD konverzije. Čip takođe poseduje i integrisani senzor koji meri sopstvenu temperaturu čipa i rezultate smešta u 12 - bitni registar. Blok šema senzora je data na *slici 8*.



Slika 8 – Bok šema senzora boje AS73211

Senzor poseduje više modova rada, a to su:

- CONT Mode kontinualni mod (senzor stalno vrši merenje i konverziju signala)
- CMD Mode komandni mod, vrši jedno merenje i konverziju kontrolisanu putem I2C komunikacije
- SYN(x) Mode sinhronizovani mod
 - SYNS Mode merenje počinje kontrolnim signalom na pinu SYN
 - SYND Mode merenje počinje i zaustavlja se u zavisnosti od kontrolnog signala na pinu SYN

S obzirom da na pločici nisu izvedeni pinovi SYN i READY, senzor se može koristiti samo u kontinualnom ili komandnom modu.

Podešavanje parametara senzora se vrši pomoću I2C komunikacije i pinova SCL i SDA, koji su izvedeni na pločici. Senzor se ponaša kao slave uređaj kada se uspostavi komunikacija, a adresa senzora je binarno: $11101A_1A_0$. Dakle, ukoliko se na I2C magistrali nalazi više senzora, adresu AS73211 senzora je moguće podesiti pomoću pinova A₁ i A₀. Na Color 6 click pločici ovi pinovi su dovedeni na masu, tako da je adresa senzora na click pločici podrazumevana i iznosi binarno: 1110100, tj. 74 heksadecimalno.

4.1.2. Način rada senzora AS73211

Na *slici 9* je dat dijagram rada senzora. Vrlo je važno pažljivo proučiti dijagram, kao i načine rada senzora definisane od strane proizvođača.



Slika 9 – dijagram rada senzora

Sa dijagrama se može zaključiti da nakon što senzor dobije napajanje prelazi u Power Down stanje. Vrlo je važno da korisnik izađe iz ovog stanja da bi se izvršila konfiguracija senzora, a zatim se prelazi u stanje u kome senzor vrši merenje. Važna napomena je da ukoliko se ne izađe iz Power Down stanja, setovanjem PD bita na logičku nulu, senzor neće moći da pređe u konfiguraciono stanje i primi parametre konfiguracije. Promena stanja se vrši pomoću OSR registra i setovanjem njegovih bita, kao što se vidi na slici. To je 8 – bitni registar, čija se sva definisana stanja mogu naći datasheetu u proizvođača.

Konfiguracija senzora se vrši upisivanjem odgovarajućih bita u dole naznačene registre.

Pomoću regisra CREG1 moguće je zadati odgovarajuće pojačanje senzora (GAIN) i vreme konverzije (TIME). Pojačanje se podešava pomoću četiri najznačajnija bita ovog registra i moguće ga je podesiti od 1 do 2048 sa korakom stepena 2. Sa četiri najmanje značajna bita ovog registra podešava se vreme konverzije, tj. vreme koje je potrebno da senzor bude izložen boji pre nego što očita podatke. Što je ekspozicija duža, senzor je precizniji. Kreće se od 1 do 16384 ms sa korakom stepena 2.

Pomoću CREG2 se podešava da li će se očitavati temperatura senzora, zatim da li će se koristiti delilac (DEVIDER) i ako hoće koja će biti njegova vrednost. Delilac se koristi da se dobiju preciznija merenja, tj. da se iskoristi puna rezolucija ADC (24 –bita), a ne samo 16 bita informacije o boji. Vrednost delioca se kreće od 2^1 do 2^8 .

Podešavanjem dva najznačajnija bita CREG 3 podešava se mod rada senzora (CONT, CMD, SYNS, SYND), zatim Stand By vreme kako bi senzor imao manju potrošnju. Podešavanje READY pina da radi kao push pull ili open drain izlaz, nije od značaja jer na pločici ne postoji pristup READY pinu. Poslednja dva bita služe za podešavanje unutrašnje frekvencije koja može biti od 1024 do 8192 MHz sa korakom umnoška 2.

Registar BREAK definiše vreme između dva uzastopna merenja kada senzor radi u CONT, SYNS ili SYND modu. Kreće se od 0 do 2048 μ s sa korakom od 8 μ s i podešava se upisivanjem decimlne vrednosti u registar od 0 do 0xFF (250 decimalno). Za ovo vreme je poželjno pročitati merenjem dobijene podatke kako se I2C komunikacija ne bi koristila za vreme konverzije i time ometala merenje senzora.

Ovim je završena konfiguracija senzora i moguće je preći u stanje merenja izdavanjem naredbe senzoru podešavanjem OSR registra. Kada istekne zadato vreme konverzije postavljeno u konfiguraciji, senzor se automatski vraća u stanje konfiguracije.

Rezultati merenja su smešteni u 16 – bitnim registrima MRES1, MRES2 i MRES3 koji redom odgovaraju rezultatima merenja X, Y i Z kanala. U registar TEMP su smešteni rezultati merenja temperature kao 12 – bitni podatak i ako je sam registar 16 – bitni.

4.2. Razvojni sistem mikromedia Plus for STM32F7

Mikromedia Plus for STM32F7 je razvojni sistem kompanije Mikroelektronika. Sistem na sebi sadrži mikorkontroler oznake STM32F747ZG, maksimalne frekvencijae rada 216MHz. Na pločici sistema su izvedena 52 pina kontrolera sa raznim funkcijama koje su dostupne korisniku i mogu se podešavati. Razvojni sistem poseduje mnoštvo elektronskih komponenata, od kojih je za potrebe projekta najznačajniji TFT displej osetljiv na dodir. Rezolucija TFT displeja je 480x272 piksela. Displej i mikrokontroler ostvaruju komunikaciju putem SSD1963 drajvera koji je takođe integrisan na razvojnom sistemu. Displej sadrži integrisanu rezistivnu foliju koja omogućava da displej bude osetljiv na dodir. Na *slici 10* prikazan je izgled razvojnog sistema.



Slika 10 - Razvojni sistem Mikromedia Plus for STM32F7

Pored displeja koriste se pinovi za I2C komunikaciju (SDA i SCK). Razvojni sistem ima mogućnost napajanja putem USB kabla ili eksternog adaptera, tako da na sebi ima izvedene pinove koji se mogu koristiti za napajanje senzora.

5. Realizacija kolorimetra

Prva što je potrebno uraditi je povezati Color 6 click pločicu sa razvojnim sistemom pomoću kratkospojnika. Na Color 6 click pločici se nalaze označeni pinovi za napajanje i masu koje je potrebno vezati na pinove razvojnog sistema koji su označeni sa 3,3 V i GND. Ostala dva pina služe kako bi se uspostavila I2C komunikacija. Razvojni sistem poseduje više pinova kojima se može odvijati ova komunikacija. Po elektronskoj šemi proizvođača razvojnog sistema utvrđeno je da je njegovi primarni pinovi I2C1 su fizički vezani za TFT displej i koriste se kako bi se registrovao dodir displeja. Iz tog razloga se koriste alternativni pinovi (I2C2) za komunikaciju sa senzorom. Pin PF0 vezuje se za SDA pin senzora, dok se pin PF1 vezuje na SCK pin senzora. Nakon ovoga potrebno je konfigurisati funkcionalnost pinova kontrolera pomoću posebnog programa.

5.1. Konfiguracija pinova kontrolera

Radi lakšeg konfigurisanja periferija poput displeja, I2C komunikacije i serijske komunikacije, upotrebljen je program konfigurator STM32CubeMX. To je alat namenjen za kontrolere iz familije STM32, gde se grafičkim putem može konfigurisati funkcionalnost njegovih pinova.

Najpre je potrebno odabrati mikrokontroler koji se nalazi na razvojnom sistemu, a to je STM32F746ZG. Nakon ovog koraka se grafički prikazuje izgled mikrokontrolera, a klikom miša moguće je odabrati funkcionalnost njegovih pinova. U kartici levo se može podesiti funkcionalnost periferija.

Kako bi se podesila funkcija određenih pinova kontrolera, potrebno je otići u karticu *Pinout*. Kako bi se koristila USB biblioteka potrebno ju je aktivirati pristupom kartici:

• MiddleWares => USB Device => Communication Device Class (Virtual Port Com).

Zatim je potrebno uključiti ostale periferije pristupom kartici *Peripherals*, gde je potrebno aktivirati I2C1, I2C2. Nakon štikliranja periferija moguće je konfigurisati određene parametre I2C komunikacije izborom kartice *Configuration*. Izabrani su sledeći parametri i za I2C1 i I2C2:

- *I2C Speed Mode => Standard*
- *I2C Speed Frequency => 100 kHz.*

Nakon toga potrebno je uključiti oscilator u kartici *Peripherals* => *RCC*. Potrebno je izabrati sledeće parametre:

- *High Speed Clock (HSE) => Crystal/Ceramic Resonator*
- Low Speed Clock (LSE) => Disable.

Sada je potrebno izvršiti podešavanja oscilatora koja se nalaze u kartici *Clock Configuration*. U polju *HCLK(MHz)* potrebno je uneti vrednost 216 MHz. Ovim parametrom je vrednost sistemskog takta mikrokontrolera postavljena na 216MHz.

U SYS odeljku kartice Peripherals potrebno je izabrati sledeće parametre:

- *Debug* => *Disable*
- *TimeBase Source => SysTick.*

Nakon ovoga potrebno je omogućiti komunikaciju između računara i razvojnog sistema pa je potrebno u *Peripherals* kartici izabrati *USB OTG FS* i sledeće podešavanje:

• *Mode* => *Device Only.*

Ovim je završeno konfigurisanje periferija, tako da je sada potrebno na osnovu izabranih podešavanja generisati kod. U kartici *Project* treba pokrenuti opciju *Generate Code* čime će se u razvojnom okruženju System Workbench for STM32 otvoriti generisan kod, baziran na prethodnim podešavanjima.

5.2. Pisanje izvršnog programa

Kao što je već napomenuto razvojno okruženje u kome je kreiran kod na osnovu izabranih podešavanja naziva se System Workbench for STM32(SW4STM32). Ovo razvojno okruženje bazirano je na Eclipse razvojnom okruženju i pruža podršku svim mikrokontrolerima iz familije STM32. Sadrži GCC C/C++ kompajler i kompatibilan je sa STM32 CubeMX konfiguratorom.

Pre nego što se počne sa pisanjem koda za potrebe ovog projekta, potrebno je ubaciti i gotove biblioteke za inicijalizaciju TFT displeja, koje imamo na raspolaganju. Potrebno je uključiti u projekat header i source fajlove pod nazivom GUIConf i LCDConf. Ovim je omogućeno prepoznavanje TFT ekrana od strane mikrokontrolera i sada je moguće pristupiti pisanju izvršnog programa.

5.2.1. Algoritam rada

Na slici ispod dat je algoritam rada uređaja, dok će u nastavku teksta detaljnije biti opisani pojedinačni koraci algoritma.



Slika 11 – Algoritam rada kolorimetra

Na početku je potrebno obezbediti napon napajanja za razvojni sistem, što je moguće učiniti preko USB kabla spajanjem na slobodan port računara. Odmah nakon toga vrši se inicijalizacija sistema. Pod inicijalizacijom se podrazumeva početno podešavanje korišćenih periferija mikrokontrolera. Na početku se najpre vrši inicijalizacija oscilatora, ulazno/izlaznih pinova mikrokontrolera i USB komunikacije. Ovo je sve učinjeno pomoću funkcija generisanih nakon izvršenih podešavanja u programu STM32CubeMX. Nakon toga je potrebno inicijalizovati ekran osetljiv na dodir, a to je moguće uraditi korišćenjem gotovih funkcija koje se nalaze u bibliotekama za TFT displej, koje su uključene u projekat. Ovim se omogućava detektovanje dodira na ekranu i uopšte prikaz podataka. Treba napomenuti da se za kreiranje interfejsa za ovaj projekat koristio program GUIBuilder, koji nakon što se izgled interfejsa kreira, generiše potreban kod, koji je potrebno prilagoditi sopstvenim potrebama. Funkcija *CreateWindow1* kreira početni prozor na kome se mogu videti polja u kojima će biti ispisano očitavanje senzora, kao i podešavanja vezana za parametre senzora. Ovo su podešavanja kroz koja prođe mikrokontroler nakon dobijanja napona napajanja. Nakon ovog koraka potrebno je preći na izvršavaje beskonačne petlje u kojoj se odvija suština programa.

Na početku beskonačne petlje uvek se proverava unos korisnika, tj. njegova interakcija sa ekranom osetljivim na dodir. Najpre je potrebno podesiti klizeće prekidče tzv. slajdere na osnovu kojih je moguće izabrati određene parametre senzora. Parametri koji su dostupni za podešavanje su: Devider, Gain i Time. Pomoću padajućeg menija takođe je moguće odabrati parametar Freq, odnosno željenu frekvenciju rada senzora. Moguće vrednosti podešavanja senzora su detaljno objašnjene u poglavlju: "Način rada senzora AS73211", dok će u narednom tekstu biti kratak podsetnik pomoću kojih slajdera je moguće podesiti određeni parametar.

- Gain podrazumeva pojačanje senzora, tj. podešavanje njegove osetljivosti na pobudu. Slajder je podešen tako da kada se prebaci u skroz levu poziciju uzima najmanje pojačanje, dok u skroz desnoj poziciji uzima najveće moguće pojačanje senzora, a svugde između moguće je birati pojačanje u koraku stepena dva.
- Time se odnosi na podrazumevano vreme konverzije senzora, tj. vreme koje je potrebno senzoru da očita koordinate boje kojoj je izložen. Ovo se drugačije naziva i ekspozicija. Što je vrednost ekspozicije veća, koordinate boje će biti tačnije, međutim ukoliko je prevelika ili čak maksimalna, biće potrebno sačekati određeno vreme dok se ne izvrši konverzija, dok pre isteka vremena senzor neće davati podatke o koordinatama boje.
- Divider ukoliko se podesi veći Gain i Time, konverzija će biti preciznija, pa će zauzimati više od 16 bita, dakle punih 24 bita. Prebacivanjem slajdera Divider ka većoj vrednosti moguće je očitati veći broj bita i samim tim rezultati očitavanja senzora će biti preciznija.
- Iz padajućeg menija moguće je izabrati unutrašnju frekvenciju rada senzora koja se kreće od 1024 do 8192 MHz.

Ovo su parametri koje je potrebno podesiti pre početka bilo kakvog merenja. Pomoću funkcije pod nazivom *SLIDER_GetValue* moguće je očitati podatke sa slajdera unesene od strane korisnika. Za učitavanje Divider slajdera iskorišćena je funkcija *Divider_kalibracija*, koja upoređuje vrednosti slajdera i ponuđenih vrednosti parametara i odabranu vrednost čuva u promenljivoj u vidu heksadecimalnog broja koji je kasnije neophodno poslati do registara za podešavanje senzora. Za svaku vrednost Dividera, u datasheet-u proizvođača senzora data je vrednost koju je potrebno upisati u odgovarajući registar. Analogno važi i za očitavanje ostalih

slajdera, dakle slične funkcije su iskorišćene, s tim što im se ime razlikuje u zavisnosti od parametra na koji se odnose, dakle *Time_kalibracija* itd. Ukoliko bi se izvršilo merenje dok su svi slajderi postavljeni na minimalnu vrednost, senzor ne bi uspeo da očita prave koordinate boje, jer je nedovoljno osetljiv na spoljašnju pobudu. S toga je vrlo važno slajdere za Gain i Time pomeriti sa minimalne vrednosti kako bi se uspešno izvršilo merenje.

Nakon podešavanja slajdera potrebno je pritisnuti *Start* dugme, kako bi se započela merenja senzora. Pritiskom na ovo dugme prvo se vrši inicijalizacija senzora pomoću funkcije *AD73211_startConfiguration*. Na ovaj način senzor će izaći iz Power Down moda i ući u konfiguraciono stanje u kojem mu je moguće poslati podatke očitane sa slajdera. Podaci su sačuvani u određenim promenljivama i moguće ih je poslati senzoru pomoću funkcije *AS73211_writeByte*, gde se kao parametri prosleđuju vrednosti promenljivih očitanih sa slajdera, kao i adrese registara senzora u koje je potrebno upisati te vrednosti. U okviru ove funkcije iskorišćena je funkcija *HAL_I2C_Master_Transmit*, koja služi da pošalje zadate podatke pomoću I2C protokola komunikacije senzoru. Pomoću ovih funkcija potrenbno je podesiti sve registre navedene u poglavlju: "Način rada senzora AS73211". Kada su svi registri podešeni senzor prelazi u stanje merenja.

Funkcijom AD73211_startMeasurement, senzor dobija komandu da treba da pređe u stanje merenja slanjem odgovarajuće komande (83 heksadecimalno) u OSR registar. Funkcijom AD73211_readXYZChannel omogućeno je očitavanje merenja senzora iz registara MRESx, a funkcijom color6_getTemperature očitavanje temperature iz registra TEMP. Pomoću funkcije EDIT_SetText su ispisane određene vrednosti očitanih X, Y, Z koordinata na ekran. Kako bi se ove vrednosti pretvorile u EE vrednosti, tj. vrednosti zračenja upadnog osvetljenja, potrebno je koristiti formulu datu u datasheet-u proizvođača, a to je:

$$Ee = \frac{FSR_{Ee}}{N_{CLK}} MRES.$$
(10)

Ovde je MRES rezultat konverzije X, Y ili Z kanala tj. MRESx registara koji im pripadaju, FSR je puna skala mogućeg detektovanog osvetljenja, a N_{CLK} je broj otkucaja takta unutar vremena konverzije tj. T_{CONV} . Ovo pretvaranje veličina implementirano je u okviru funkcije *color6_convertingToEe*. Ovi rezultati se kovertuju u string, pomoću funkcije *ftoa*, a kako bi ih bilo moguće ispisati na ekranu koristi se već pomenuta funkcija *EDIT_SetText*.

Ukoliko korisnik pritisne *Stop* dugme merenje se zaustavlja, a na ekranu se javlja ispis poslednje očitanih koordinata boje. Nakon ovoga moguće je pritiskom na dugme *Next* preći na sledeći ekran, gde se može videti vizuelni prikaz boje u vidu tačke na hromatskom dijagramu, a pored njega ispis x, y, i z koordinate boje. Za prelazak na drugi prozor iskorišćena je funkcija *CreateWindow2*.

CIE hromatski dijagram je slika u bitmap formatu, koja je ubačena u GUIBuilder program. Hromatske koordinate x i y odgovaraju osama CIE hromatskog dijagrama što se može videti na *slici 5*. Pošto je na slici poznato da donji levi ugao zauzimaju koordinate (x,y) = (0,0), dok gornjem desnom uglu odgovaraju koordinate (x,y)=(0,75, 0,85), potrebno je iz X, Y i Z koordinata očitanih sa senzora izračunati x, y i z koordinatu boje. Ovo je moguće učiniti korišćenjem jednačina (7), (8) i (9), a zatim ove koordinate ispisati na ekranu pored hromatskog dijagrama, kako bi pregled tačke na dijagramu bio intuitivniji. Sada je potrebno skalirati izračunate koordinate, kako bi se crnom tačkom mogla vizuelno prikazati u koji deo hromatskog dijagrama spada boja očitana sa senzora. Pošto je poznato da slika hromatskog dijagrama ima rezoluciju od 308 x 272 piksela, potrebno je izračunati koordinate pod nazivom *cie_x* i *cie_y*. Treba voditi računa da je slika hromatskog dijagrama postavljena tako da se smerovi x osa dijagrama i x osa ispisivanja ekrana poklapaju, dok za y ose imaju obrnut smer. Na osnovu sledećih jednačina se vrši skaliranje i izračunavanje koordinata potrebnih za ispis na ekran.

$$cie_x = \frac{308 \cdot x}{0.75} \tag{11}$$

$$cie_y = 272 - \frac{272 \cdot y}{0.85}$$
 (12)

Pomoću ovih koordinata na hromatskom dijagramu je ispisana crna tačka koja odgovara koordinatama očitane boje. Ukoliko korisnik klikne na dugme *Previous*, vraća se na početni ekran gde sistem čeka da se ponovo podese parametri senzora pomoću slajder prekidača.

Na ovaj način korisnik može da očita koordinate željene boje, zatim da zaustavi dalja očitavanja, odloži senzor i pređe na sledeći prozor kako bi video u koji deo hromatskog dijagrama pada očitana boja. Ukoliko korisnik poželi da senzor kontinualno očitava boje gde se dinamički prikazuju podaci o svakoj boji na koju prisloni senzor, onda je potrebno da pritisne samo *Start* dugme, nakon čega je moguće klikom na dugme *Next* videti dinamički prikaz očitanih boja na hromatskom dijagramu. Tek nakon pritiska na *Stop* dugme moguće je promeniti parametre senzora pomoću slajder prekidača.

6. Izgled gotovog uređaja

Na *slici 12* prikazan je izgled interfejsa prvog prozora, dok se očitava određena boja. Sa leve strane se vrši ispis X, Y i Z koordinata senzora, kao i sopstvena temperatura senzora izražena u °C. U sredini se prikazuje ispis EE vrednosti svake koordinate, dok se sa desne strane nalaze slajderi i padajući meni za podešavanje parametara senzora. Takođe se pri dnu ekrana nalaze dugmad za *Start, Stop*, kao i *Next*, pomoću kojeg se prelazi na sledeći prozor – *slika 13*.



Slika 12 – Početni ekran prilikom očitavanja koordinata crvene boje

Na ovom prozoru se nalazi prikaz crvene boje na hromatskom dijagramu, tj. vizuelni prikaz x, y i z koordinata u vidu crne tačke, na dijagrmu, kao i njihov ispis sa desne strane.



Slika 13. – Prikaz hromatskog dijagrama i ispis vrednosti x, y, i z koordinata očitane crvene boje

Ustanovljeno je da senzor ima najpreciznija očitavanja kada je boja koju očitava dobro osvetljena ili ima sopstveno osvetljenje, kao npr. boje očitane sa displeja. U dodatku A se mogu videti očitavanja nekoliko boja sa displeja mobilnog telefona, kao i njihov prikaz na hromatskom dijagramu.

7. Zaključak

Kao što je već napomenuto kolorimetri su senzori boje koji su se u praksi pokazali kao korisni uređaji u oblastima u kojima je potrebno precizno odrediti koordinate određene boje. Njime se postiže očitavanje boje po sistemu koji je nezavistan od uređaja, tj. dobija se najpribližnije očitavanje boje onako kako je čovek zaista vidi. Ovo je značajno iz razloga kako bi se određena boja mogla što vernije reprodukovati.

Ovim projektom je konstruisan kolorimetar pomoću dostupnih komponenata. Kako se iz prethodnog teksta vidi, korišćen je gotov senzor boje sa Color 6 click pločice. Iskorišćena je njegova puna funkcionalnost, jer se putem interfejsa mogu podešavati parametri i time je omogućeno preciznije očitavanje koordinata boje. Očitavanja su zadovoljavajuća, međutim u praksi ne dovoljno precizna. Naime, ovaj senzor ima i jednu manu, a to je što se boja koja se očitava mora osvetliti "belom" svetlošću D65 standarda i jedino tada će imati najpreciznija očitavanja. S obzirom da je ovakav izvor osvetljenja zahtevno konstruisati i njegova cena je proporcionalno tome veća, senzor se ne može na ovakav način koristiti za profesionalnu upotrebu. Svakako je dovoljno osvetliti očitavanu površinu belim svetlom bilo kog izvora i moguće je dobiti solidnu preciznost, tako da će senzor retko promašiti nijansu očitavane boje. Najbolja očitavanja se postižu ukoliko boja koja se očitava ima sopstveno osvetljenje, npr. sa displeja telefona ili računara.

Ovaj projekat je koristan za demonstrativne svrhe, a pokazao se kao dobar način za primenu teorije o bojama praksi. Sa dobrim osvetljenjem postignuti su zadovoljavajući rezultati.

8. Literatura

- [1] R.W.G. Hunt, M.R. Pointer, 2011, "Measuring Colour Fourth edition", UK.
- [2] Bajić J. "Kolorimetrija", FTN Katedra za elektroniku skripta
- [3] <u>https://sr.wikipedia.org/sr-el/Vidljivi_spektar</u> pristupljeno: 3.3.2020.
- [4] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space</u> pristupljeno: 3.3.2020.
- [5] <u>https://www.mikroe.com/color-6-click</u> pristupljeno: 04.03.2020.
- [6] <u>https://www.mouser.com/datasheet/2/588/AS73211_DS000556_3-01-1366202.pdf</u> datasheet senzora AS73211, pristupljeo: 04.03.2020.

Dodatak A





