WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego



ROZPRAWA DOKTORSKA

Konstrukcja i oprogramowanie LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej

mgr inż. Sławomir Łuniewski

(imie i nazwisko doktoranta)

Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa

(wydział)

Inżynieria Mechaniczna

(dyscyplina)

prof. dr hab. inż. Bogdan Zygmunt

(imię i nazwisko opiekuna pracy)

dr inż. Waldemar Śmietański

(imię i nazwisko opiekuna pomocniczego pracy)

Warszawa 2021

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Bogdanowi Zygmuntowi za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowania pracy doktorskiej, wyrozumiałość i motywację.

Wyrazy wdzięczności składam Panu dr inż. Waldemarowi Śmietańskiemu za zainspirowanie tematyką wyświetlaczy 3D, za przekazaną wiedzę oraz pomoc w rozwoju naukowym.

Serdecznie dziękuję również rodzinie i przyjaciołom za nieustanne wsparcie, motywację i wszelką pomoc.

Spis treści

	Wykaz	ważniejszych skrótów, oznaczeń i indeksów	8			
1	Wprow	Wprowadzenie 1				
2 Przegląd istniejących technologii wyświetlania trójwymiarowego						
	2.1	Klasyfikacja technologii	15			
	2.2	Grafika komputerowa 3D	17			
	2.2.1	Metoda śledzenia promieni	17			
	2.2.2	Metoda energetyczna	17			
	2.2.3	Renderowanie objętości				
	2.3	Stereoskopia binokularna	19			
	2.3.1	Metoda anaglifowa	19			
	2.3.2	Metoda polaryzacyjna				
	2.3.3	Metoda migawkowa				
	2.3.4	Wyświetlacze nahełmowe HMD				
	2.4	Autostereoskopia	23			
	2.4.1	Wielowidokowe wyświetlacze 3D	23			
	2.4.1.	1 Metody oparte na zjawisku okluzji				
	2.4.1.	2 Metody oparte na zjawisku refrakcji				
	2.4.1.	3 Metody oparte na zjawisku odbicia	25			
	2.4.1.	4 Metody oparte na zjawisku projekcji				
	2.4.1.	5 Metody oparte na zjawisku dyfrakcji				
	2.4.2	Wyświetlacze holograficzne				
	2.4.2.	1 System wyświetlania holograficznego "Mark"				
	2.4.2.	2 System wyświetlania pola światła "Holographic"				
	2.4.3	Wolumetryczne wyświetlacze 3D				
	2.4.3.	1 Układy statyczne z ekranem pasywnym				
	2.4.3.	2 Układy statyczne z ekranem aktywnym				
	2.4.3.	3 Układy dynamiczne z ekranem pasywnym				
	2.4.3.	4 Konstrukcje dynamiczne z ekranem aktywnym				
	2.5	Sferyczny wyświetlacz z wirującą linijką LED-ową w wersji 1.0				
	2.6	Podsumowanie przeglądu				
	2.7	Cel i zakres pracy	40			
3	Idea pr	ojekcji obrazu ''LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania				
	rzeczyv	vistości wirtualnej''	41			

	3.1	Koncepcja konstrukcyjna	41
	3.2	Rzeczywistość wirtualna	42
	3.3	Właściwości wyświetlacza	42
4	Struktu	ıra i własności funkcjonalne LED-owego wyświetlacza kulistego	44
5	Model	matematyczny kulistego wyświetlacza	48
	5.1	Model wyświetlania obrazu na kulistym wyświetlaczu	48
	5.1.1	Metody akwizycji danych trójwymiarowych	49
	5.1.2	Proces przetwarzania danych obrazu trójwymiarowego	53
	5.1.3	Model matematyczny wizualizacji jednej warstwy obrazu	57
	5.1.4	Model matematyczny wizualizacji trójwymiarowej kulistego wyświetlacza	62
	5.2	Model matematyczny ruchomej części konstrukcji kulistego wyświetlacza	65
	5.2.1	System Identification Toolbox - Matlab	66
	5.2.2	Identyfikacja modelu ruchomej części kulistego wyświetlacza	66
	5.2.3	Regulator cyfrowy PID	68
	5.2.4	Dobór parametrów regulatora PID	69
6	Projekt	t, konstrukcja i uruchomienie LED-owego wyświetlacza kulistego	71
	6.1	Projekt konstrukcji mechanicznej	71
	6.1.1	Podstawa LED-owego wyświetlacza kulistego	71
	6.1.2	Układ napędowy wirującej części urządzenia	73
	6.1.3	Czujnik położenia kątowego wirującego układu linijek LED-owych	73
	6.1.4	Wirujący układ linijek LED-owych	75
	6.2	Budowa modelu LED-owego wyświetlacza kulistego	77
	6.3	Uruchomienie i wyważanie modelu	80
	6.3.1	Omówienie metod wyważania	80
	6.3.2	Opis procesu wyważania metodą amplitudowo–fazową z wykorzystaniem układu czujników oraz oscyloskopu cyfrowego	82
	6.3.3	Wyważenie wirującej części kulistego wyświetlacza LED-owego	84
7	Opraco	wanie obwodów elektronicznych i oprogramowanie mikrokontrolerów	88
	7.1	Dobór podzespołów elektronicznych	88
	7.1.1	Dobór i badanie diod LED	89
	7.1.2	Sterowanie diod LED	93
	7.1.3	Dobór nadrzędnych mikrokontrolerów	97
	7.2	Projektowanie obwodów drukowanych	99
	7.2.1	Środowisko Altium Designer	. 100

7.2.2	Projekty obwodów linijek LED-owych 101	
7.2.3	Projekt obwodu modułu sterującego napędem wirującej części wyświetlacza oraz interfejsem użytkownika	
7.2.4	Projekt obwodu modułu komunikacyjnego 108	
7.3	Oprogramowanie mikrokontrolerów110	
7.3.1	Oprogramowanie mikrokontrolerów linijek LED-owych111	
7.3.2	Oprogramowanie mikrokontrolera sterującego napędem oraz graficznym interfejsem użytkownika	
8 Opraco urządzo	wanie i uruchomienie oprogramowania narzędziowego i zarządzającego eniem116	
8.1	Środowisko programistyczne Visual Studio116	
8.2	Biblioteka OpenCV117	
8.3	Aplikacja narzędziowa i zarządzająca LED-owym wyświetlaczem kulistym 118	
9 Podsumowanie 119		

Wykaz ważniejszych skrótów, oznaczeń i indeksów

A. Skróty

AOM	_	Acousto-Optic Modulator
BLDC	_	BrushLess Direct-Current
BPV	_	Bit Per Voxel
CAD	_	Computer Aided Design
CAM	_	Computer-Aided Manufacturing
CAN	_	Controller Area Network
CGH	_	Computer-Generated Hologram
CPU	_	Central Processing Unit
CRC	_	Cyclic Redundancy Code
CRT	_	Cathode Ray Tube
CRW	—	Centrum Rozwojowo Wdrożeniowe
DCMI	_	Digital Camera Interface
DMA	_	Direct Memory Access
DMIPS	_	Dhrystone Million Instructions Per Second
DPL	_	Digital Light Processing
DSP	_	Digital Signal Processing
DVR	_	Direct Volume Rendering
ECAD	_	Electronic Computer-Aided Design
EXTI	_	External Interrupt/Event Controller
FAT	_	File AllocationTable
FDM	_	Fused Deposition Modeling
FFT	_	Fast Fourier Transform
FPGA	_	Field-Programmable Gate Array
FPU	_	Floating Point Unit
GCC	_	GNU Compiller Collection
GDB	_	GNU Project Debugger
GPU	_	Graphics Processing Unit
GUI	_	Graphical User Interface
HAL	_	Hardware AbstractionLayer
HDL	_	Hardware Description Language
HMD	_	Head Mounted Display
IVR	_	Intermediate Volume Rendering
LC	_	Liquid-Crystal
LCD	_	Liquid Crystal Device
LCOS	_	Liquid-Crystal-On-Silicon
LED	_	Light-EmittingDiode
MCAD	_	Mechanical Computer-Aided Design
MIP	_	Maximum Intensity Projection
MIT	_	Massachusetts Institute of Technology

NURBS	_	Non-Uniform Rational B-Spline
NVIC	_	Nested Vectored Interrupt Controller
OASLM	_	Optically Addressed Spatial Light Modulator
PCB	_	Printed Circuit Board
PID	_	Proporcjonalno-Całkująco-Różniczkujący
POV	_	Persistence Of Vision
PWM	_	Pulse Width Modulation
RGB-D	_	Red Green Blue-Depth
RISC	_	Reduced Instruction Set Computing
SD/MMC	_	Multi Media Card)
SDIO	_	Secure Digital Input / Output interface
SISO	_	Single-Input Single-Output
SPI	_	Serial Peripheral Interface
STL	_	Standard Tessellation/Triangulation Language
ToF	_	Time Of Flight
UART/USART	_	Universal Asynchronous/Synchronous Receiver-Transmitter
WPF	_	Windows Presentation Foundation

B. Oznaczenia i indeksy

f	_	liczba obrotów linii diod LED na sekundę
g	_	przyspieszenie ziemskie
i	_	indeks wierszy tablicy obrazu
j	_	indeks kolumn tablicy obrazu
k	_	indeks głębi tablicy obrazu
K _p	_	wzmocnienie członu proporcjonalnego
K _i	_	wzmocnienie członu całkującego
K _d	_	wzmocnienie członu różniczkującego
m	_	liczba cykli aktualizacji stanów diod LED na obrót
m _r	_	masa wirnika
m _c	_	masa kalibracyjna
m _k	_	masa korekcyjna
n	_	liczba diod LED w układzie liniowym
OBRAZ	_	macierz danych dowolnego obrazu
р	_	wartość tonalną koloru określająca odpowiedz punktu świetlnego
r	_	promień wiodący
r _c	_	mimośrodowość zamocowania masy kalibracyjnej
r _{krok}	—	krok kwantyzacji wartości promienia wiodącego
S	_	liczba warstw obrazu
t	_	czas
T _i	—	czas zdwojenia
T _d	_	czas wyprzedzenia
φ	-	długość azumutalna

ϕ_{krok}	_	krok kwantyzacji wartości długości azymutalnej
\$ 0	_	początkowa długość azymutalna
Φ	_	strumień świetlny
θ	_	odległość zenitalna
θ_{krok}	-	krok kwantyzacji wartości odległości zenitalnej
ω	_	częstość obrotowa wirnika

1 Wprowadzenie

Zaprojektowanie urządzenia prezentującego obraz wirtualnej rzeczywistości jest tematem badań wielu naukowców. Powstałe technologie wyświetlania trójwymiarowego są odpowiedzią na zapotrzebowanie ludzkiego mózgu, który przystosowany jest do odbioru złożonych informacji przestrzennych z jakimi ma do czynienia obserwując świat realny, a którego nie umożliwiają popularne wyświetlacze dwuwymiarowe. Podjęcie zadania opracowania niestosowanej dotąd techniki, polegającej na budowie LED-owego wyświetlacza kulistego umożliwiającego kreowanie obrazów przestrzennych z informacją o głębi, stanowi główny cel rozprawy.

Przeprowadzony przegląd literatury naukowej oraz baz patentowych z zakresu technologii wyświetlania trójwymiarowego, ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań będących w tej samej klasie konstrukcyjnej do której zaklasyfikowano nowoopracowany wyświetlacz, umożliwił analizę aktualnego stanu techniki. Publikowane opisy wynalazków, których daty zgłoszeń przypadają na lata 2014-2020, dotyczące wyświetlaczy z dynamicznym układem projekcyjnym i aktywnymi emiterami światła, przedstawiają możliwość generowania jedynie pojedynczej warstwy obrazu, opisanej na płaskiej lub zakrzywionej powierzchni. W zbliżonym okresie nie znając jeszcze wyżej wymienionych publikacji opracowałem w ramach moich prac inżynierskiej i magisterskiej własne warianty działających modeli wyświetlaczy ze skanowaniem mechanicznym. Urzadzenia wykorzystując naturalną "bezwładność" ludzkiego zmysłu wzroku wytwarzają widoczny dla obserwatora wirtualny obraz, powstały w wyniku zsynchronizowanego z położeniem cyklicznego zapalania i gaszenia diod LED. Odnosząc zaawansowanie własnych konstrukcji z aktualnie patentowanymi rozwiązaniami, można wnioskować, że poziom rozwijanej przeze mnie technologii wyświetlania, już na etapie poprzedzających opracowań był w czołówce międzynarodowej.

Opracowane konstrukcje dały podstawę do dalszych prac w kierunku rozwoju technologii. Analiza konkurencyjnych rozwiązań wyznaczyła zaś przestrzeń do realizacji innowacyjnej metody wyświetlania opierającej się na skanowaniu mechanicznym obrazu przez kilka linijek LED-owych tworzących niezależne widoki umieszczone jeden za drugim, a także budowy fizycznego modelu potwierdzającego skuteczność tej metody.

W oparciu o zdobyte doświadczenie w zakresie badań i konstrukcji wyświetlaczy ze skanowaniem mechanicznym oraz przeprowadzonej analizie możliwości technologicznych z dziedziny informatycznej i elektronicznej postawiono tezę rozprawy:

Możliwe jest opracowanie urządzenia prezentującego obraz wirtualnej rzeczywistości stworzony na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego

Wynikami prac projektowych, eksperymentów konstrukcyjnych i wdrożeń innowacyjnych rozwiązań technicznych jest zbudowanie nowatorskiego urządzenia mechatronicznego, które można zaliczyć do klasy wyświetlaczy wolumetrycznych 3D, gdzie obraz tworzy się na powierzchni pełnej sfery. Oryginalność wyświetlacza w skali światowej

polega na jednoczesnym wyświetlaniu różnych obrazów na wielu sferach jednocześnie, skutkiem czego jest optyczne złudzenie istnienia trzeciego wymiaru nakładających się obrazów, prostopadłego do powierzchni sferycznych. Nowością jest również przyjęta w założeniach modułowość konstrukcji, która cechuje elementy mechaniczne oraz rozwiązanie elektroniczno programowe. Dzięki temu istnieje możliwość rozbudowy urządzenia o kolejne moduły generujące warstwy obrazu, których liczba limitowana jest jedynie stopniem miniaturyzacji wykorzystanych w konstrukcji elementów fizycznych

W rozprawie doktorskiej przedstawiono w sposób całościowy projekt i realizację LED-owego wyświetlacz kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej. Nakreślony cel i główne zadania niniejszej pracy wyznaczyły jej układ. W pierwszej części rozprawy obejmującej rozdziały 2,3,4,5 przeprowadzono analizę teoretyczną zaproponowanej metody wyświetlania trójwymiarowego. Po dokonaniu przeglądu literaturowego i klasyfikacji istniejących metod z dziedziny wyświetlania 3D wyznaczony został kierunek dalszych badań. przedstawiono założenia ideowe wyświetlania wirtualnych Nastepnie obrazów przestrzennych, koncepcję i założenia konstrukcyjne, a także pełną strukturę i właściwości funkcjonalne nowoopracowanego wyświetlacza. Praktyczna realizacja założeń koncepcyjnych poprzedzona symulacją komputerową opartą na opracowanym modelu została matematycznym, mającą na celu wstępną weryfikację skuteczności, oraz optymalizację algorytmu wyświetlania trójwymiarowych obrazów. Model matematyczny wyświetlania obrazu rozszerzony został o opis procesów akwizycji i przetwarzania danych trójwymiarowych. Opracowany został ponadto model ruchomej części układu wyświetlacza.

W drugiej części rozprawy obejmującej rozdziały 6,7,8 przedstawiono opis zagadnień konstrukcyjno-programowych. Przedstawiono projekt i realizację układu mechanicznego wraz opisem wyważania i uruchomienia wirującego, osiowo-niesymetrycznego układu. Następnie przybliżono rozwiązanie części elektronicznej urządzenia. Scharakteryzowano sposób doboru i badań kluczowych zastosowanych podzespołów elektronicznych, przedstawiono projekty schematów i obwodów drukowanych oraz wyjaśniono działanie algorytmów zaimplementowanych w mikrokontrolerach. Uzupełnieniem części praktycznej pracy jest przedstawienie możliwości opracowanego oprogramowania do zarządzania pracą kulistego wyświetlacza.

Końcowa część rozprawy zawiera podsumowanie wykonanych prac projektowych, konstrukcyjnych i teoretycznych, w wyniku których powstał działający model wyświetlacza do projekcji obrazów 3D. Oceniono jakość tworzonych wizualizacji przestrzennych, przedstawiono perspektywę zastosowań i dalszych prac badawczych rozwijanej technologii wyświetlania 3D.

2 Przegląd istniejących technologii wyświetlania trójwymiarowego

Realny świat otacza nas trójwymiarowością. Tradycyjne urządzenia wyświetlające są zdolne do prezentowania jedynie dwuwymiarowych płaskich obrazów pozbawionych głębi tzn. trzeciego wymiaru. Przyczynia się to do znacznego ograniczenia zdolności człowieka do postrzegania i rozumienia złożoności obiektów i perspektywy świata rzeczywistego. Jest to o tyle istotne, że niemal połowa zasobów ludzkiego mózgu jest wykorzystywana do przetwarzania informacji wizualnych [1].

Tradycyjne wyświetlacze 2D, takie jak lampy kineskopowe CRT (ang. Cathode Ray Tube), ekrany ciekłokrystaliczne LCD (ang. Liquid Crystal Device) czy wyświetlacze plazmowe często wprowadzają niejednoznaczność w wielowymiarowej prezentacji grafiki czego powodem jest brak prawdziwej informacji dotyczącej głębi obrazu. Nawet przy wsparciu zaawansowanego programowego renderingu 3D, złożoność odwzorowania i wyświetlania trójwymiarowych obiektów na dwuwymiarowym ekranie nie zapewnia skutecznie prawidłowych relacji przestrzennych oraz informacji o głębi. Brak prawdziwego obrazu trójwymiarowego może stanowić zagrożenie dla naszej zdolności do prawidłowej wizualizacji danych wielowymiarowych, które są często spotykane w zaawansowanych systemach naukowych, projektowaniu wspomaganym komputerowo (CAD), obrazowaniu medycznym i wielu innych dyscyplinach. Zasadniczo urządzenie wyświetlające 2D musi polegać na zdolności człowieka do składania trójwymiarowego, zdolność percepcyjna nie jest wiarygodna, jeśli nie otrzymuje on istotnych wskazówek dotyczących głębi.

Grafika komputerowa jest w stanie poprawić nasze wrażenia trójwymiarowości podczas oglądania obrazów przestrzennych. Chociaż ulepszony obraz 3D wydaje się mieć głębię (lub objętość), nadal ze względu na naturę wyświetlania dwuwymiarowego na płaskim ekranie, jest to tylko wizerunek dwuwymiarowy. Aby rozpoznać trzeci wymiar, ludzki system wzrokowy potrzebuje zarówno fizycznych, jak i psychologicznych wskazówek dotyczących głębi [2]. Wskazówki fizyczne mogą być wprowadzone tylko przez prawdziwe obiekty trójwymiarowe, natomiast psychologiczne wskazówki można wywołać za pomocą obrazów 2D. Istnieją cztery główne fizyczne wskazówki dotyczące głębi, których wymaga ludzki mózg do uzyskania prawdziwego wrażenia trójwymiarowego:

- Akomodacja inaczej nastawność oka, to proces polegający na dostosowaniu oka do oglądania przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach. Jest to możliwe dzięki zmianie kształtu soczewki w wyniku skurczu mięśnia rzęskowego.
- **Zbieżność** to pomiar różnicy kątowej między kierunkami patrzenia dwojga oczu widza, gdy patrzy on jednocześnie na ten sam punkt śledząc obiekt. Opierając się na zasadzie triangulacji, im bliżej obiektu, tym bardziej oczy muszą się zbiegać.
- **Paralaksa ruchu** zapewnia wskazówki dotyczące głębi poprzez porównanie względnego ruchu różnych elementów w scenie 3D. Kiedy głowa widza się porusza, bliższe obiekty przestrzenne wydają się poruszać szybciej niż te, które są dalej od niego.

• **Rozbieżność obuoczna** odnosi się do różnic w obrazach uzyskiwanych przez lewe i prawe oko. Im dalej znajduje się obiekt 3D, tym bardziej oddalone są od siebie dwa obrazy.



Rys. 1. Podział wskazówek dotyczących głębi. Źródło: opracowanie własne na podstawie [3]

Niektóre urządzenia prezentujące trójwymiarowe projekcje mogą zapewnić wszystkie te fizyczne wskazówki dotyczące głębi, podczas gdy inne techniki wyświetlania 3D mają pewne ograniczenia. Na przykład filmy 3D oparte na okularach stereo mogą powodować zmęczenie oczu z powodu konfliktu akomodacji i zbieżności, ponieważ wyświetlane obrazy są na ekranie, a nie w fizycznej odległości w przestrzeni 3D. Ludzki mózg może również uzyskać wrażenie trójwymiarowości poprzez wyodrębnienie psychologicznych wskazówek głębi z dwuwymiarowych obrazów monookularowych. Należą do nich:

- **Perspektywa liniowa** to pojawienie się względnej odległości między obiektami 3D, na przykład iluzja zbiegających się torów kolejowych w odległym punkcie na horyzoncie.
- **Okluzja** to niewidoczne części obiektów za nieprzezroczystym przedmiotem. Ludzki mózg interpretuje częściowo przesłonięte obiekty jako leżące dalej niż te, które się przed nim znajdują.
- **Cieniowanie** rzucane przez jeden obiekt na inny daje silne wskazówki dotyczące trójwymiarowej zależności przestrzennej. Różnice w intensywności pomagają ludzkiemu mózgowi wywnioskować kształt powierzchni i orientację obiektu.
- **Tekstura** to niewielkie struktury na powierzchni obiektu, które można wykorzystać do wyznaczenia trójwymiarowego kształtu obiektu, jak również jego odległości od obserwatora.
- Wcześniejsza znajomość znanych rozmiarów i kształtów typowych struktur (sposobu, w jaki światło oddziałuje z ich powierzchniami oraz tego, jak zachowują się w ruchu) może być wykorzystana do wnioskowania o ich trójwymiarowych kształtach i odległości od widza.

Ludzki system wizualny postrzega trójwymiarową scenę poprzez podświadomą analizę wykorzystując dynamikę wzroku skupionego na próbkowaniu różnych cech obiektów. Zbadany został ogólny charakter zmienności niektórych sygnałów głębi w funkcji odległości od obserwowanych obiektów. Wpływ głównych fizycznych wskazówek dotyczących głębi zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości, podczas gdy efekty psychologicznych wskazówek pozostają niezmienne. Urządzenia prezentujące obraz sztucznej rzeczywistości często mają trudności z jednoczesnym dostarczeniem wszystkich fizycznych i psychologicznych wskazówek dotyczących głębi. Dla przykładu wyświetlacze bazujące na technologii wolumetrycznej mogą nie być w stanie zapewnić cieniowania lub tekstury ze względu na nieodłączną przezroczystość wyświetlanych wokseli.

Technologie wyświetlania trójwymiarowych projekcji są tematem badań naukowców od blisko wieku. Celem jest opracowanie wydajnego narzędzia do wizualizacji oraz zrozumienia projekcji złożonych, wielowymiarowych danych i skomplikowanych obiektów. Obraz zaś powinien funkcjonować jako "okno na świat", przez które widzowie mogą postrzegać tę samą trójwymiarową scenę, jakby ekran wyświetlacza 3D był przezroczystym "oknem" dla rzeczywistych obiektów

2.1 Klasyfikacja technologii

Wiedza z zakresu kreowania trójwymiarowych projekcji rozwijała się i popularyzowała się na przestrzeni kilkudziesięciu ostatnich dekad. Naukowcy podążając za rozwojem technologii przeprowadzili szereg badań i włożyli wiele wysiłku w próby opracowań coraz to nowszych metod tworzenia rzeczywistości wirtualnej. Część opracowań udało się wdrożyć na rynku komercyjnym, niektóre zaś stanowią jednostkowe modele pokazowe. Klasyfikacja w tym rozdziale prezentuje drogi rozwoju poszczególnych technologii z ogólnym omówieniem sposobu działania oraz streszczeniem wad i zalet, skupiając się w przede wszystkim na najnowocześniejszych rozwiązaniach. Na rys. 2. przedstawiono usystematyzowany podział technologii, do którego odnoszą się również kolejne podrozdziały tej części pracy [3, 4, 5].



Rys. 2. Schemat podziału technologii wyświetlania trójwymiarowego. Źródło: opracowanie własne na podstawie [3, 4, 5]

2.2 Grafika komputerowa 3D

Grafika trójwymiarowa jest dziedziną grafiki komputerowej zajmującą się przede wszystkim wizualizacją obiektów trójwymiarowych. Dane trójwymiarowe mogą zostać pobrane ze świata rzeczywistego, m.in. za pomocą skanerów 3D, tomografów komputerowych, zdjęć satelitarnych lub stereoskopowych. Obiekty mogą również zostać zamodelowane w środowiskach inżyniersko-naukowych. Wizualizacja trójwymiarowa wykorzystuje renderowanie zwane inaczej syntezą obrazu do generowania fotorealistycznego obrazu z modeli 2D lub 3D, za pomocą odpowiednich algorytmów i obliczeń matematycznych. W procesie tym rozpatrywane są odbicia, cienie, załamanie światła, wpływy atmosfery i efekty wolumetryczne.

2.2.1 Metoda śledzenia promieni

Najczęściej wykorzystywaną metodą renderowania w programach do grafiki trójwymiarowej jest metoda śledzenia promieni (ang. raytracing). Pozwala ona na bardzo wierne odwzorowanie obrazu z uwzględnieniem wielu rzeczywistych zjawisk fizycznych. Technologia opiera się na analizowaniu tylko tych promieni światła, która trafiają bezpośrednio do oka obserwatora przez piksele ekranu. Metoda śledzenia promieni działa w kierunku przeciwnym do rzeczywistego kierunku biegu promieni. Oznacza to, że algorytm śledzi światło zaczynając od poszczególnych pikseli, badając drogę promienia odpowiadającego danemu punktowi powierzchni przez całą scenę aż do momentu, gdy promień osiągnie źródło światła. Technologia okupiona jest wysokimi wymaganiami sprzętowymi, przez co najczęściej jest stosowana w przemyśle filmowym. Zaawansowany rozwój kart graficznych od niedawna umożliwia również wykorzystanie metody raytracing do renderowania w czasie rzeczywistym.



Rys. 3. Technologia śledzenia promieni. Źródło: strona internetowa wikipedia.org/wiki/Śledzenie_promieni

2.2.2 Metoda energetyczna

Kolejnym sposobem wizualizacji obiektów trójwymiarowych w grafice komputerowej jest wykorzystanie metody energetycznej (ang. radiosity). Algorytm działania wywodzi się

z badań nad promieniowaniem cieplnym, a w dziedzinie grafiki komputerowej po raz pierwszy pojawił się w 1984 r. Radiosity wyznacza globalny rozkład natężenia światła uwzględniając pochłaniania i odbicia światła jakie mają miejsce na wszystkich powierzchniach znajdujących się na scenie. Technologia ta w niemal idealny sposób modeluje to samo, co obserwuje się w rzeczywistym świecie, gdzie każda powierzchnia pochłania światło, a także odbija jego część. Metoda energetyczna nie uwzględnia efektów świetlnych zależnych od położenia obserwatora takich jak rozbłyski na powierzchniach metalicznych, odbicia zwierciadlane i załamanie światła. Technologia ta uwzględnia wyłącznie odbicia rozproszone, tj. intensywność światła odbitego jest niezależna od kierunku. Dzięki temu uzyskane wyniki są niezależne od położenia obserwatora, co pozwala na wielokrotną, dowolną wizualizację sceny bez ponawiania obliczeń. Jest to również podstawowa różnica w odniesieniu do metody śledzenia promieni. Oba opisane rozwiązania są nazywane "zorientowanymi powierzchniowo". Opierają się na założeniu, że większość generowanych obiektów składa się z nieprzezroczystej powłoki, upraszczając w ten sposób złożoność problemu wyświetlania.



Rys. 4. Rendering objętościowy. Źródło: strona internetowa pl.qaz.wiki/wiki/Volume_rendering

2.2.3 Renderowanie objętości

Odmienną technologią trójwymiarowego zobrazowania zaawansowanych projektów naukowo-inżynierskich, tomografii czy symulacji numerycznych jest rendering objętościowy (ang. Volume Rendering). Ma on na celu uzyskanie kompletnego, precyzyjnego i efektywnego wyświetlania danych wolumetrycznych, pozwalającego na dokładną analizę rozpatrywanego pola skalarnego. Wykorzystanie najnowszych osiągnięć w dziedzinie grafiki komputerowej pozwala na wizualizację nie tylko powierzchni obiektów, także ich wnętrza, przez wykorzystanie efektów przezroczystości i półprzezroczystości. Rendering objętościowy

wyróżnia podział na kilka metod pozwalających na wyświetlanie danych wolumetrycznych m. in. pośrednią IVR (ang. Intermediate Volume Rendering) bezpośrednią DVR (ang. direct volume rendering) oraz MIP (ang. Maximum Intensity Projection) [6]. Przyjmując za podstawę operowanie na ogromnej ilości danych, pozwala przedstawić wnętrza skomplikowanych obiektów o zmiennej przeźroczystości, umożliwiając wykonanie wizualizacji niedostępnych lub obliczeniowo zbyt kosztownych dla innych metod.

Technologie wizualizacyjne oparte na grafice komputerowej wykorzystują jedynie psychiczne wskazówki dotyczące głębi. Brak fizycznych wskazówek pozwala stwierdzić, że są jedynie "pseudo" projekcjami trójwymiarowymi. Warto jednak podkreślić niewątpliwe zalety takie jak szerokie spektrum zastosowań, ogólna dostępność oraz wysoka rozdzielczość.

2.3 Stereoskopia binokularna

Stereoskopia binokularna jest techniką obrazowania oddającą wrażenie normalnego widzenia stereoskopowego, to znaczy odwzorowującą nie tylko kształt i kolor obiektów, ale także ich wzajemne zależności przestrzenne, odległość od obserwatora i głębię sceny. Wymaga dostarczenia do mózgu dwóch obrazów, widzianych z perspektywy lewego i prawego oka. W tym celu wykonuje się parę zwykłych dwuwymiarowych obrazów (stereoparę), reprezentujących obiekt lub scenę z dwóch punktów widzenia, oddalonych tak jak oczy obserwatora. Obrazy składowe stereopary są bardzo podobne, ale różnią się nieco kątem widzenia obiektów i szczegółami wzajemnego przesłaniania się obiektów w scenie. To właśnie te drobne różnice niosą informację o trzecim wymiarze. Przy pomocy jednej z wielu technik prezentacji przedstawia się lewy obraz lewemu oku, a prawy prawemu. W mózgu następuje połączenie tych dwóch obrazów w jeden obraz przestrzenny, zwany cyklopowym, ponieważ odbieramy go tak, jakby był widziany przez jedno "trójwymiarowe" oko umieszczone u nasady nosa

2.3.1 Metoda anaglifowa

Metoda anaglifowa jest jedną z technik stereoskopowych. Złudzenie trójwymiarowości uzyskiwane podczas obserwacji osiągane jest za pomocą specjalnych, najczęściej czerwono-cyjanowych okularów. Sporządzenie anaglifów polega na nałożeniu na siebie dwóch zdjęć, wykonanych z lekkim poziomym przesunięciem, odpowiadającym obrazom dla lewego i prawego oka. Zdjęcia takie można uzyskać używając szyny nakładanej na statyw lub specjalnych aparatów fotograficznych o dwóch obiektywach. Do połączenia dwóch zdjęć specjalistyczne oprogramowanie komputerowe. stosuje sie Anaglify rysunków wykorzystywane są przy geometrii przestrzennej. Do zalet tego typu grafiki należy łatwa technika jej wykonania i niska cena okularów filtrujących. Wadami są zaś występujące przy oglądaniu przebarwienia, spowodowane przez kolorowe szkiełka i nieodwzorowanie przestrzennych szczegółów. Obiekty na anaglifach wprawdzie są posegregowane na plany, ale często sprawiają wrażenie jakby były wycięte z kartonu i ustawione w przestrzeni. Technika anaglifowa jest jedną z metod tworzenia filmów 3D.



Rys. 5. Schemat działania metody anaglifowej oraz metody polaryzacyjnej. Źródło opracowanie własne na podstawie [3]

2.3.2 Metoda polaryzacyjna

Kolejną metodą należącą do technologii stereoskopowych jest metoda polaryzacyjna. Wyświetlany obraz klatki filmu dla jednego oka przechodzi przez jeden filtr, a emitowana za chwilę druga klatka filmu (lekko przesunięta) przeznaczona dla oka drugiego przechodzi przez drugi filtr. Obie trafiają następnie na ekran wyposażony w specjalną powłokę. Kierunki polaryzacji obu wykorzystywanych w projekcji filtrów są względem siebie prostopadłe, a obserwator zaopatrzony jest w specjalne okulary z analogicznie ustawionymi filtrami polaryzacyjnymi. W ten sposób jedno oko widzi tylko przeznaczone dla niego obrazy o polaryzacji pionowej, drugie zaś o poziomej, co sprawia, że oglądany ruchomy obraz jest obrazem trójwymiarowym. Wizualizowany obraz ma lepszą jakość niż ten, który tworzony jest przy wykorzystaniu techniki anaglifowej. W obu wypadkach obraz oglądany bez okularów jest do siebie bardzo podobny tzn. oba są w ten sam sposób rozmyte. Problemem technologii polaryzacyjnej jest spadek rozdzielczości obrazu o połowę. Zaletą zaś niski koszt okularów i brak konieczności ich zasilania.

2.3.3 Metoda migawkowa

Następną metodą umożliwiającą oglądanie stereoskopowych obrazów trójwymiarowych jest metoda migawkowa. Polega na szybkim wyświetlaniu na monitorze dwóch niezależnych obrazów jeden po drugim. W tym czasie, dzięki synchronizacji z okularami ciekłokrystalicznymi, jedna migawka zamyka się, a druga pozostaje otwarta. Chwilę później następuje zmiana i to druga migawka zostaje uruchomiona, a pierwsza wraca do punktu wyjścia. Widoki lewego i prawego oka są wyświetlane naprzemiennie, kilkadziesiąt razy na sekundę. Ludzki system wzrokowy jest w stanie łączyć składowe obrazu bez efektu migotania dzięki bezwładności organu wzroku zwanej "trwaniem widzenia". Wadą technologii jest obserwacja ciemniejszego obrazu w odniesieniu do prezentacji 2D. Do zalet należy jakość trójwymiarowej wizualizacji, niewątpliwie najlepsza z wyżej omówionych

metod, obserwacja obrazu w pełnej rozdzielczości i mała wrażliwość na położenie głowy i kąt widzenia.



Rys. 6. Schemat działania metody migawkowej. Źródło: opracowanie własne na podstawie [3]

2.3.4 Wyświetlacze nahełmowe HMD

Najnowszą i jednocześnie najbardziej obiecującą technologią wyświetlania trójwymiarowego w grupie stereoskopii binokularnej są wyświetlacze nagłowne HMD (ang. Head Mounted Display) i gogle projekcyjne. W obu wypadkach chodzi o urządzenia zakładane na głowe, wyposażone w miniaturowe ekrany umieszczone tuż przed oczami. Generowany przez nie obraz jest więc nieustannie w polu widzenia użytkownika, niezależnie od tego, w którą stronę spojrzy i zwróci głowę. W większości wyświetlaczy nagłownych stosuje się dwa monitory - po jednym na każde oko, aby nadać prezentowanym treściom efekt głębi i wrażenie przestrzeni za pomoca stereoskopowej wizualizacji 3D i soczewek o odpowiednim promieniu krzywizny. HMD i gogle projekcyjne mogą być używane do oglądania półprzezroczystego obrazu narzuconego na widok świata rzeczywistego, tworząc tzw. rzeczywistość rozszerzoną. Odbywa się to w wyniku odbijania obrazów wideo przez częściowo odblaskowe lustra, lub fuzję obrazu z kamer umieszczonych na urządzeniu z generowana grafiką trójwymiarową. Wyświetlacze nagłowne mogą być również zintegrowane z modułami inercyjnymi, dzięki czemu są w stanie śledzić ruch głowy pozwalając użytkownikowi poruszać się w wirtualnym świecie. Technologia znajduje zastosowanie przede wszystkim w różnego rodzaju symulatorach oraz grach komputerowych. Oczekuje się jednak, że w najbliższym czasie zostanie wykorzystana na szeroką skalę w obsłudze i zarządzaniu złożonych systemów, ponieważ może dać użytkownikowi to, co jest efektywnym "widzeniem rentgenowskim" łącząc renderowanie grafiki komputerowej

ukrytych elementów z naturalnym widzeniem człowieka. Przykładam takiego zastosowania jest medycyna z wdrożoną do użytku cyfrową platformą chirurgiczną, która łączy wizualizację 3D danych anatomicznych (skanów tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego) z obrazem widzianym przez chirurga.



Rys. 7. Schamat działania wyświetlaczy nagłownych HMD wraz z wizualizacją możliwości działania. Źródło: opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.geekweek.com

Jedną z głównych skarg użytkowników wyświetlaczy stereoskopowych jest niespójność wskazówek dotyczących głębi, zjawisko zwane konfliktem akomodacyjnozbieżnościowym [7]. Ilustrację tego zjawiska przedstawia rys. 8. Kiedy obserwatorzy oglądają stereoskopowe obrazy wyświetlane na ekranie, mięśnie oczu skupiają wzrok na odległości do ekranu wyświetlacza tj. odległości ogniskowania, aby wyraźnie widzieć obrazy wyświetlane na ekranie. Wynika to z funkcji akomodacji ludzkiego oka. Z drugiej strony, percepcja obiektów trójwymiarowych dostarczana przez projekcję 3D przekazuje ludzkiemu mózgowi informacje, że obiekty trójwymiarowe znajdują się w "rzeczywistej" odległości, tak że zbieżność oczu widza znajduje się na odległości zbieżnościowej. Jak pokazano na rys. 8. w wyświetlaczach stereoskopowych odległość ogniskowania niekoniecznie jest równa odległości zbieżnościowej. Ten typ konfliktu wzrokowego może powodować odczuwalne zmęczenie ludzkiego zmysłu wzrokowego, a także być przyczyna dyskomfortu i bólu głowy po dłuższym czasie oglądania obrazów stereoskopowych. Konflikt akomodacyjnozbieżnościowy można złagodzić zwiększając liczbę promieni świetlnych pochodzących z różnych widoków i które mogą być jednocześnie dostrzegane przez widza. Opisywany problem nie występuje w technologiach autostereoskopowych opisanych w dalszej części pracy.



Rys. 8. Konflikat akomodacyjno zbieżnościowy. Źródło opracowanie własne na podstawie [3,7]

2.4 Autostereoskopia

Autostereoskopia to technologia umożliwiająca oglądanie obrazu generującego iluzję głębi bez konieczności używania dodatkowych urządzeń w postaci nakryć nagłownych czy okularów. Efekt trójwymiarowości uzyskiwany jest w dwojaki sposób. W pierwszym z nich trójwymiarowy obraz generowany jest na powierzchni zmodyfikowanych monitorów LCD. Na tej metodzie bazują urządzenia zwane wielowidokowymi wyświetlaczami 3D (ang. Multiview 3D Display). Drugi sposób wyświetlania autostereoskopowego wymaga konstrukcji specjalnych systemów, które kreują projekcję przestrzeni bezpośrednio w trzech wymiarach. Na tym sposobie obiera się holografia oraz technologia wolumetryczna.

2.4.1 Wielowidokowe wyświetlacze 3D

Głównym celem systemów projekcji trójwymiarowych jest wierne odtworzenie pola światła generowanego przez obiekty fizyczne w świecie rzeczywistym. Pole światła (ang. light field) definiowane jest jako funkcja wektorowa, która opisuje ilość światła przepływającego we wszystkich kierunkach przez każdy punkt w przestrzeni. Odwzorowanie pola światła jest bardzo trudnym zadaniem ze względu na nieskończoną liczbę różnych widoków rzeczywistej sceny. Bezstratne duplikowanie go jest nie do osiągnięcia. Praktyczną możliwością implementacji projekcji trójwymiarowej jest pobranie wycinków ciągłego pola świetlnego, a następnie łączenie skończonej liczby widoków kreując wrażenie rzeczywistego obrazu. Takie przybliżenie jest możliwe i praktyczne, jeśli liczba odtworzonych widoków jest na tyle duża, aby przekroczyć kątową rozdzielczość ludzkiego systemu wzrokowego. Skonstruowane wielowidokowe wyświetlacze 3D generują efekt paralaksy najczęściej w kierunku poziomym, umożliwiając lewemu i prawemu oku widza oglądanie różnych widoków trójwymiarowych obiektów z wielu pozycji kątowych. Istnieje kilka gałęzi rozwoju autostereoskopowych multiwidokowych wyświetlaczy 3D. Zgodnie z ogólną klasyfikacją [3,8] można je podzielić na metody oparte na okluzji, refrakcji, dyfrakcji, odbiciu i projekcji.

2.4.1.1 Metody oparte na zjawisku okluzji

Podejścia oparte na okluzji mają jedną wspólną cechę, polegająca na zastosowaniu blokady na ścieżce optycznej. Ze względu na efekt paralaksy części obrazu są niewidoczne dla jednego oka, będąc jednocześnie widoczne dla oka drugiego. Rozwiązania techniczne różnią się liczbą szczelin widokowych (od gęstej siatki do pojedynczej szczeliny pionowej), trybem prezentacji (sekwencyjnej lub stacjonarnej) oraz tym, czy nieprzezroczyste bariery są umieszczone przed lub za ekranem obrazu.

Jedną z podstawowych metod opartych na okluzji jest bariera paralaksy. Wykorzystuje maskę szczelinową przed ekranem, aby przesłonić poszczególne jego sekcje, które powinny być widoczne tylko z jednej strefy widzenia [9]. Parametry konstrukcyjne bariery paralaksy muszą być precyzyjnie dobrane i zależą od przewidywanej odległości od oczu obserwatora. Ważne jest również aby uzyskać płynne przejście paralaksy ruchu między sąsiednimi widokami. W tym celu konieczne jest zapewnienie skutecznego nakładania się profili iluminacji przy zachowaniu braku rozmycia wyświetlanych obrazów. Do istotnych wad jakie są spotykane w wyświetlaczach opartych na barierze paralaksy należą: zmniejszona jasność, ograniczona rozdzielczość, możliwości pojawiania się artefaktu odwracania obrazu podczas przekraczania strefy oglądania, określona liczb stref widokowych i prawdopodobieństwo wystąpienia efektów dyfrakcyjnych w maskach z wąskimi szczelinami. Technologia mimo tych wad jest nadal rozwijana, najczęściej w zastosowaniu do niewielkich ekranów urządzeń mobilnych. Przykładem jest m.in. ręczna konsola Nintendo 3DS.

2.4.1.2 Metody oparte na zjawisku refrakcji

Kolejna gałąź rozwoju autostereoskowych wyświetlaczy 3D opiera się na zjawisku refrakcji. Metoda polega na pokryciu przedniej warstwy ekranu uporządkowaną strukturą grubych, płasko-wypukłych soczewek [10]. Funkcja układu soczewkowego jest optycznie analogiczna do funkcji ekranu z barierą paralaksy z tą różnicą, że jest przezroczysta, a zatem sprawność optyczna jest znacznie wyższa niż jego odpowiednika z barierą paralaksy. Aby zapewnić wrażenie trójwymiarowości wyświetlanych obiektów rozdzielczość ekranu dwuwymiarowego jest podzielona na wiele widoków. Liczbę widoków wyznacza liczba pikseli liczonych w osi poziomej znajdująca się bezpośrednio pod powierzchnią jednej soczewki. Liniowy układ soczewek musi być wyrównany z pionowymi kolumnami pikseli na ekranie dwuwymiarowym. Poszczególna kolumna pikseli jest zatem przypisana do pojedynczego widoku. Odpowiednie ustawienie pozycji widza przed ekranem zapewnia mu obserwację obrazu stereo, zaś poruszanie głową umożliwia doświadczenie paralaksy ruchu wizualizowanych obiektów. Zasadnicza zaleta wyświetlaczy soczewkowych iest wykorzystanie istniejącej infrastruktury do produkcji ekranów 2D. Ich realizacja jest stosunkowa prosta i tania. Mimo, że urządzenia tej technologii oferują lepszą jasność i wyższą możliwą rozdzielczość niż wyświetlacze z barierą paralaksy, nie są pozbawione wad. Należą do nich trudność z wyrównaniem matrycy soczewek z ekranem, możliwość pojawiania się nieprawidłowości postrzegania widoków na granicy stref oraz ograniczona rozdzielczość i liczba widoków. Wielowidokowe wyświetlacze 3D bazujące na metodzie soczewkowej są stale ulepszane. Opracowano szereg zaawansowanych technik mających na celu poprawę jakości, kompensując wymienione wady. Jednym z rozwiązań jest wprowadzenie ukośnego systemu soczewek, który rozprowadza utratę rozdzielczości zarówno w kierunku poziomym jak i pionowym zwiększając jednocześnie liczbę wyświetlanych widoków. Na rynku komercyjnym istnieje obecnie wiele telewizorów 3D opartych na matrycach ze skośnym układem soczewek produkowanych m. in. przez Sharp, Philips i Toshiba.



Rys. 9. Zestawienie technik projekcji trójwymiarowych opartych na metodzie okluzji (bariera paralaksy) oraz metodzie refrakcji (arkusz soczewkowy). Źródło: opracowanie własne na podstawie strony internetowej en.wikipedia.org/wiki/Parallax_barrier

2.4.1.3 Metody oparte na zjawisku odbicia

Następny typ wielowidokowych wyświetlaczy 3D opiera się na zjawisku odbicia. Wykorzystywane są dwa panele LCD, których obrazy nakładają się przez częściowo przepuszczalne zwierciadło zwane rozdzielaczem wiązki [11]. Każdy panel LCD wyposażony jest w soczewkę polową umieszczoną w ognisku rzeczywistego obrazu w celu kolimacji promieni światła przechodzących przez ten obraz bez wpływu na jego właściwości geometryczne. Rzutowane są strumienie oświetlenia lewego i prawego obrazu na odpowiednie oko obserwatora. W efekcie obraz po prawej stronie wydaje się ciemniejszy dla lewego oka i odwrotnie. Takie rozwiązanie pozwala uniknąć wszystkich trudności wynikających z małych tolerancji dopasowania elementów optycznych z pikselami. Na rys. 10. została przedstawiona ogólna zasada wyświetlania trójwymiarowego opartego na zjawisku odbicia. Należy dodać, że w przypadku śledzenia głowy widza konieczne jest użycie

ruchomych źródeł światła. Dostęp dla wielu użytkowników jest możliwy natomiast poprzez zastosowanie niezależnych oświetlaczy, co dodatkowo komplikuje konstrukcję urządzenia.



Rys. 10. Schemat systemu projekcji trójwymiarowej bazujący na metodzie odbicia. Źródło: opracowanie własne na podstawie [11]

2.4.1.4 Metody oparte na zjawisku projekcji

Jeszcze inna technologia wielowidokowych wyświetlaczy 3D opiera się na zjawisku projekcji. Polega ona na zastosowaniu płaszczyzny dwuwymiarowej do odzwierciedlenia punktów faktycznie istniejących w przestrzeni o trzech wymiarach. Projektor składający się ze źródła światła i układu optycznego formuje obraz, który zostaje wyświetlony na ekranie projekcyjnym. W odróżnieniu do tradycyjnych projekcji dwuwymiarowych technologie wzbogacone są o różne rozwiązania techniczne w zależności od rozwijanego kierunku. Jedno z podejść zakłada zastosowanie zestawu wielu urządzeń projekcyjnych oraz ekranu w formie dyfuzora pionowego [12]. Każdy punkt holograficznego ekranu w kontrolowany sposób emituje wiązki światła o różnych kolorach i intensywności rozchodzących się w wielu kierunkach. Wiązki światła są generowane przez system modulacji światła ułożony w określonej geometrii, a ekran projekcyjny dokonuje niezbędnej transformacji optycznej, aby skomponować te wiązki w ciągły widok 3D. Przy odpowiedniej kontroli programowej, wiązki światła opuszczające różne piksele mogą rozchodzić się w wielu kierunkach, tak jak byłyby emitowane przez obiekty fizyczne z ustalonych lokalizacji przestrzennych. Przykładem urządzenia opierającego sposób działania na opisanej metodzie jest wyświetlacz HoloVizio opracowany przez wegierską firmę Holografika [13]. Urządzenie wykorzystuje właściwości dyfuzji jednowymiarowej, oraz wiele projektorów które oświetlają ekran holograficzny. W poziomym przekroju poprzecznym widz może zobaczyć tylko jedną bardzo cienką szczelinę obrazu z każdego projektora, zakładając, że ekran rozprasza światło tylko w kierunku pionowym. Aby wygenerować jedną perspektywę widzenia, te cienkie szczeliny z różnych projektorów muszą być połączone w całość, dlatego też wyświetlacz wymaga współpracy wielu projektorów. W konstrukcji systemu wyświetlania HoloVizio użyto aż 80 projektorów, które dzięki lusterkom po obu stronach i efektom odbicia są w stanie wygenerować aż 200 widoków wysokiej rozdzielczości. Mimo złożonej budowy i konieczności wykonywania precyzyjnych kalibracji podzespołów, urządzenie zostało wprowadzone na rynek komercyjny i jest dostępne w kilku wariantach gabarytowych.



Rys. 11. Wielowidokowy wyświetlacz 3D bazujący na metodzie projekcyjnej na przykładzie projektu "HoloVizio". Źródło: opracowanie własne na podstawie [12, 13]

2.4.1.5 Metody oparte na zjawisku dyfrakcji

Ostatnia technologia która umożliwia wielowidokowym wyświetlaczom 3D generowanie głębi obrazu wykorzystuje zjawisko dyfrakcji. Bazą jest matryca, w której piksele odpowiadające za kreowanie perspektywy sąsiednich widoków grupowane są w pakiety (ang. jumbo pixels) [14]. Górną warstwę stanowią małe siatki dyfrakcyjne umieszczone przed każdym zbiorem pikseli, które rozpraszają i kierują światło na obszar postrzegania odpowiedniego obrazu. Specjalne wzory siatek projektowane są z założeniem wygenerowania wielu widoków widzianych z różnych stron. Ze względu na możliwość uzyskania szerokokątnych widoków z pełną paralaksą przy jednoczesnym niskim profilu zintegrowanego wyświetlacza metoda mogłaby znaleźć zastosowanie w urządzeniach mobilnych. Technologia aktualnie jest badana i rozwijana, co przedstawiają publikowane wyniki eksperymentalne [15].

Konstrukcji, które można zaliczyć do grupy wielowidokowych wyświetlaczy 3D jest wiele, jednak sposoby ich działania opierają się na opisanych wyżej zjawiskach fizycznych. Niewątpliwą zaletą większości rozwiązań tego typu jest możliwość wykorzystania istniejącej technologii ekranów dwuwymiarowych, modyfikując je poprzez dodanie aktywnych optycznie warstw lub barier oraz programową implementację funkcji przetwarzających grafikę do wyświetlania wielu widoków obrazu. Przekłada się to na zapewnienie dostępności urządzeń przy jednocześnie akceptowalnych kosztach. Podstawową wadą, z jaką borykają się opisywane autostereoskopowe systemy wyświetlania 3D są preferowane pozycje obserwacji projekcji (ang. sweetspots), w których widzowie mogą uzyskać najlepszą czułość 3D. Lokalizacje preferowanych pozycji obserwacji są zwykle ustalane i optymalizowane przez projekt optyczno-elektroniczny systemu trójwymiarowej wizualizacji. Poza tym większość wielowidokowych wyświetlaczy 3D oferuje ograniczone wskazówki dotyczące zbieżności oraz głębokości akomodacji, ze względu na fakt, że obrazy wyświetlane są najczęściej na płaskich lub nieco zakrzywionych ekranach. Wady tej pozbawione są wyświetlacze wolumetryczne i holograficzne opisane w dalszej części rozdziału.

2.4.2 Wyświetlacze holograficzne

Holografia jest działem optyki zajmującym się technikami uzyskiwania obrazów trójwymiarowych, która umożliwia rejestrację i późniejszą rekonstrukcję frontu falowego promieniowania świetlnego rozproszonego od powierzchni obiektów [16]. Przez rekonstrukcję frontu falowego rozumie się odtworzenie nie tylko amplitudy (intensywności), lecz także kierunku ruchu, częstotliwości i fazy fali świetlnej odbitej od obiektu. W związku z tym, w idealnym przypadku nie powinno być różnicy między obserwacją naturalnego obiektu lub sceny a oglądaniem ich hologramu. Technologia teoretycznie jest w stanie wiernie przedstawić wirtualne okno ze sceną świata rzeczywistego z uwzględnieniem wszystkich aspektów trójwymiarowości obiektów. Praktyczna realizacja ekspozycji holograficznej wciąż wiąże się z wieloma ogromnymi wyzwaniami technicznymi. Dla przykładu, klarowne wyświetlacze holograficzne wymagają rozmiaru piksela mniejszego niż 1 µm, co prowadzi do projekcji wielu bilionów pikseli na ekranie o rozsądnych rozmiarach. Tak ogromna ilość danych stanowi pozornie niewyobrażalne wyzwania techniczne dla całego łańcucha systemu obrazowania 3D, w tym akwizycji, przetwarzania, transmisji oraz wizualizacji obrazów trójwymiarowych.

Tradycyjne holograficzne technologie wyświetlania trójwymiarowego są podzielone na dwie główne kategorie. Pierwszą jest holograficzny druk statycznych obrazów 3D. Drugą, której zostanie poświęcony szerszy opis, stanowią systemy komputerowo generowanych hologramów (ang. Computer-Generated Hologram) z dynamicznymi obrazami 3D [17]. Kluczowym elementem wykonania CGH są przestrzenne modulatory światła (ang. Spatial light modulator), które w zależności od konstrukcji, wykorzystują różne mechanizmy działania. Do głównych typów modulatorów używanych w budowie wyświetlaczy holograficznych należą sterowane elektroniczne Digital Light Processing (DPL) oraz Liquid-Crystal-On-Silicon (LCOS), kontrolowane akustycznie Acousto-Optic Modulator (AOM), a także sterowane optycznie Optically Addressed Spatial Light Modulator (OASLM). Obecne systemy komputerowo generowanych hologramów osiągają stosunkowo niską jakość wizualizacji trójwymiarowej, ponieważ najczęściej opierają się na technologii LCD lub LCOS z limitami skalowania wynoszącymi od 2 do 4 μ m, co ogranicza kąt projekcji do wartości mniejszej niż 10°. Kąt projekcji holograficznego systemu wyświetlania jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości jego pikseli. Uzyskanie piksela, którego rozmiar jest porównywalny lub mniejszy od długości fali używanego światła widzialnego, jest niezbędne do osiągnięcia wysokiej wydajności dyfrakcyjnej i szerokich kątów widzenia powyżej 40°.

2.4.2.1 System wyświetlania holograficznego "Mark"

Istotnymi z punktu widzenia rozwoju technologii trójwymiarowych wyświetlaczy holograficznych są konstrukcje opracowane przez naukowców z Instytutu Technologicznego w Massachusetts MIT (ang. Massachusetts Institute of Technology) [19]. Systemy te obliczają wzorce prążków w scenach 3D, a następnie przy udziale lasera ze spójną wiązką wyświetlają je fragmentami w modulatorze akustyczno-optycznym. Skaner mechaniczny wykonuje skanowanie rastrowe obrazu modulatora w celu uzyskania projekcji większych rozmiarów. Pozioma strefa widzenia osiągnięta przez prototypy wynosi około 30°, rozdzielczość pionowa to 144 linie, zaś objętość projekcji opisują wymiary 150×75×150 mm.



Rys. 12. Schemat systemu wyświetlania holograficznegoMARK II opracowanego przez naukowców z MIT wraz z przykładem generowanego hologramu. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [19]

Ze względu na ogromną ilość informacji które trafiają do systemu i muszą zostać przetworzone, koniecznym było dokonanie pewnych kompromisów projektowych, których skutkiem było ograniczenie całkowitej przepustowości danych. Osiągnięto częstotliwość odświeżania na poziomie kilku klatek na sekundę, przy czym wielkość każdej z nich przekracza 30 MB. Ze względu na to, że do generowania holograficznych wzorów prążków

potrzebna jest złożona symulacja fizyczna a co za tym idzie potężne zasoby obliczeniowe, obecnie trudno jest uzyskać wyższą częstotliwość odświeżania hologramu. Istotnym etapem rozwoju systemu dokonanym przez naukowców w MIT jest zwiększanie rozmiaru wyświetlanych obrazów poprzez zastosowanie równoległych kanałów modulujących światło oraz segmentowego skanera poziomego [18]. Takie rozwiązanie zapewnia możliwość skalowania urzadzenia, kosztem podniesienia stopnia skomplikowania w postaci zwielokrotnienia kanałów wejściowych wideo i bardziej zsynchronizowanych obwodów lustrzanych. Wśród cech systemu dużym mankamentem, którego nie można pominąć, jest możliwość wizualizowania jedynie monochromatycznych obrazów. Ponadto mimo wysokiej złożoności konstrukcji osiągana jakość hologramu znacząco odbiega od możliwości typowych wyświetlaczy dwuwymiarowych.

2.4.2.2 System wyświetlania pola światła "Holographic"

Inną koncepcją projekcji zaklasyfikowaną do grupy wyświetlaczy holograficznych jest system wyświetlania pola światła o nazwie "Holographic" opracowany przez amerykańską firmę Zebra Imaging [20]. Twórcy charakteryzują urządzenie jako działający w czasie rzeczywistym z pełną paralaksą, interaktywny, kolorowy wyświetlacz holograficzny. Urządzenie umożliwia przeglądanie strumieniowanych danych dla 20 uczestników, zapewniając im wizualizowanie trójwymiarowych obrazów widzianych z każdej strony. System zapewnia widzom również możliwość interakcji z wyświetlaczem poprzez obracanie i sięganie po dowolne części oglądanego obrazu. powiększanie, Ten "holograficzny" wyświetlacz 3D nie jest oparty na tradycyjnych zasadach holograficznych, które polegają na interferencji światła w celu odtworzenia widocznych obiektów 3D. Zamiast tego, obraz z pełną paralaksą 3D jest oparty na zasadzie pełnego pola światła paralaksy [20]. Na rys. 13. przedstawiono ogólną architekturę modułów konstrukcyjnych systemu. Danymi wejściowymi do systemu wyświetlania mogą być zsyntetyzowane modele 3D lub profile powierzchni trójwymiarowych obiektów w scenie zarejestrowane przez kamerę 3D. Wejściowe dane trafiają do modułu transmisji, który rozdziela zadania obliczeniowe, wysyłając je do jednostki "HogelComputation". Moduł ten składa się z wielu równoległych płyt przetwarzających, które obliczają cały zestaw promieni pola świetlnego dla wszystkich widocznych punktów na powierzchni obiektów 3D. W prototypie pierwszej generacji urządzenia promienie pola świetlnego o wymiarach 84×72 mm obliczono z każdego punktu na powierzchni. Wyniki obliczeń modułu "Hogel Computation" są wysyłane za pośrednictwem modułu "Hogel Distribution" do przestrzennego modulatora światła. Dwadzieścia cztery modulatory są używane do budowy bloku konstrukcyjnego w postaci pojedynczej płytki ekranu. Każdą płytkę obsługuje sześć płyt FPGA i trzy moduły systemu obliczeniowego GPU. Cały prototypowy wyświetlacz o wymiarach 300×300 mm zbudowany jest z około 150 płytek generując 500 milionów hogeli. Ten wysoce zaawansowany system wyświetlania pola światła charakteryzują cechy wspólne z wyświetlaczami wielowidokowymi, jednakże dziedziczy jedną z ich wad w postaci możliwości pojawiania się artefaktów podczas zmian pozycji obserwacji hologramu. System wymaga również złożonej kalibracji poszczególnych płytek wyświetlacza, co utrudnia jego skalowalność.



Rys. 13. Schemat systemu wyświetlania pola światła o nazwie "Holographic" opracowanego przez firmę Zebra Imaging wraz z przykładem generowanego hologramu. Źródło: opracowanie własne na podstawie [20,21]

Wyświetlacze holograficzne są obecnie badaną i rozwijaną technologią wyświetlania trójwymiarowego. Umożliwiają projekcje przestrzennych obiektów z zapewnieniem fizycznych wskazówek dotyczących głębi. Ograniczenia w jakości wyświetlanych hologramów wynikaja najczęściej z braku technicznych możliwości dostarczenia odpowiednich zasobów przetwarzania danych. Nieustanny w technikach postęp elektroniczno-informatycznych wraz z upływem czasu najprawdopodobniej będzie zmniejszał te ograniczenia. Innym aspektem jest duży stopień skomplikowania systemów generujących hologramy, co w przełożeniu na wysoką cenę i niską dostępność może przyczynić się do ograniczenia liczby zastosowań.

2.4.3 Wolumetryczne wyświetlacze 3D

W przeciwieństwie do wielowidokowych wyświetlaczy 3D, które przedstawiają widzom prawidłowy widok trójwymiarowych obiektów w określonych strefach oglądania, techniki wolumetrycznego wyświetlania, podobnie jak w holografii, umożliwiają projekcje "objętościowych" obrazów w rzeczywistej przestrzeni. Każdy woksel, czyli najmniejszy punkt świetlny w strefie projekcji trójwymiarowej (odpowiednik piksela w grafice dwuwymiarowej) jest fizycznie umieszczony w położeniu przestrzennym, w którym powinien się znajdować i odbija światło w wielu kierunkach, tworząc rzeczywisty obraz w oczach obserwatorów. Takie wolumetryczne wyświetlacze 3D dostarczają zarówno fizjologicznych, jak i psychologicznych wskazówek dotyczących głębi dla ludzkiego układu wzrokowego w celu postrzegania trójwymiarowych obiektów i są one uważane za urządzenia skuteczniejsze i bardziej pożądane dla ludzkiego interfejsu wizualnego w odniesieniu do

innych istniejących rozwiązań wyświetlania trójwymiarowego. Podstawowym kryterium podziału wyświetlaczy wolumetrycznych jest rodzaj zastosowanego medium projekcyjnego. Wyróżniamy nieruchome układy statyczne oraz układy dynamiczne ze skanowaniem mechanicznym.

Dodatkowo, charakterystyczną właściwością rozróżniającą poszczególne rozwiązania jest sposób przetwarzania energii i emisji światła. Metody pasywne wymagają użycia zewnętrznego źródła promieniowania wykorzystując efekty odbicia, załamania lub przepuszczania światła z innych źródeł oraz emisję przez konwersję energii wzbudzenia (ang. up-conversion). Wyświetlacze aktywne natomiast emitują światło w wyniku przekształcenia energii elektrycznej na uporządkowane wiązki fotonów.

2.4.3.1 Układy statyczne z ekranem pasywnym

Jednym z podstawowych wymagań dla wolumetrycznego systemu wyświetlania 3D jest wypełnienie całej objętości projekcyjnej wokselami, które można selektywnie wzbudzać. Statyczne wyświetlacze z pasywnymi ekranami osiągają ten cel najczęściej wykorzystując dwa niezależne układy laserowe sterowane w sposób cykliczny, które aktywują woksel w miejscu przecięcia się wiązek laserów [22]. Promieniowane kierowane jest przez lustra i skanery w kierunku obudowy zawierającej odpowiedni materiał lub nośnik wyświetlania. Następuje proces znany jako dwufotonowa konwersja energii wzbudzenia. Polega on na wykorzystaniu energii dwóch fotonów w podczerwieni do pompowania materiału na poziom wzbudzony, z którego może dokonać widocznego przejścia fluorescencji na niższy poziom energetyczny. Aby proces ten był użyteczny, nośnik wyświetlania musi wykazywać właściwość absorbcji dwóch fotonów z dwóch różnych długości fal, tak aby woksele włączały się tylko na przecięciu dwóch niezależnych źródeł laserowych. Wykorzystując efekt bezwładności ludzkiego wzroku i odpowiednio szybkiego skanowania przez wiązki promieniowania, możliwe jest narysowanie trójwymiarowego obrazu. Obraz będzie wydawał się stabilny, nawet jeśli światło zostanie zatrzaśnięte w dowolnym punkcie objętości tylko przez niewielki ułamek czasu. Zaletami tego typu wyświetlaczy wolumetrycznych jest zdolność do wypełniana całej przewidzianej objętości obrazem bez martwych punktów oraz możliwość skalowania przestrzeni projekcyjnej. Trudnościami technicznymi koncepcji jest ograniczona prędkość skanerów, co przekłada się na liczbę generowanych wokseli, możliwość wyświetlania wielu kolorów oraz problem bezpieczeństwa wzroku, jaki stwarzają promienie laserowe.



Rys. 14. Schemat metody wyświetlania bazujący na procesie konwersji enrgii wzbogacania w górę wraz z przykładem projekcji. Źródło: opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.lasefx.com oraz [22]

2.4.3.2 Układy statyczne z ekranem aktywnym

Kolejną kategorię technologii wolumetrycznych stanowią statyczne wyświetlacze z aktywnym ekranem. Należące do tej grupy urządzenia można podzielić na dwie zasadniczo różniące się koncepcje. Pierwsza z nich opiera swoje działanie na zastosowaniu trójwymiarowej macierzy adresowanych punktów świetlnych, które w sposób uporządkowany wypełniają aktywną przestrzeń wyświetlacza. Woksele mogą występować w postaci zarówno diod LED [23], jak również dyfuzyjnych zakończeń wiązek światłowodowych [24].Włókna optyczne są niejako medium transmisyjnym świetlnego sygnału generowanego przez modulator, którym jest najczęściej matryca LCD ekranu dwuwymiarowego. Powstanie przestrzennego obrazu następuje w wyniku aktywacji odpowiednich zbiorów wokseli przy zachowaniu przezroczystości w czasie spoczynku. Koncepcja mimo prostych założeń konstrukcyjnych, okazuje się być bardzo skomplikowana w produkcji przy próbach osiągnięcia zadowalającej rozdzielczości. Zbudowane do tej pory prototypy laboratoryjne najczęściej nie przekraczają 1000 wokseli.

Odmienną ideę prezentują wyświetlacze wolumetryczne, których aktywny ekran stanowi stos przełączalnych elektronicznie warstw ciekłokrystalicznych. Sposób działania systemu został przedstawiony na rys. 15. Zastosowany projektor wyświetla sekwencyjnie warstwy obrazu trójwymiarowego na arkuszach LC (ang. Liquid-Crystal), które rozpraszają światło na skutek przyłożonego napięcia, bądź zostają optycznie czyste, gdy napięcie nie jest przyłożone. Czas projekcji jest kontrolowany i synchronizowany z aktywacją odpowiedniej warstwy ciekłokrystalicznej. Wolumetryczna projekcja tworzona jest na wielu arkuszach grubości jednego woksela, znajdujących się w różnej odległości od obserwatora [25]. Ludzki system wzrokowy łączy poszczególne klatki obrazu w jeden spójny widok. Podstawowym wyzwaniem technicznym opisywanej koncepcji jest wdrożenie odpowiednio szybkiego układu projekcyjnego, który wprost odpowiada za rozdzielczość obrazu. Kolejne istotne zagadnienie to konieczność zastosowania arkuszy ciekłokrystalicznych o jak najmniejszym spadku transmisji optycznej. Nawet niewielkie tłumienie pojedynczej warstwy zwielokrotnione dużą ich liczbą przekłada się na niską jasność obrazu. Wyświetlacze bazujące na tej technologii zostały wprowadzone na rynek komercyjny i są produkowane m.in przez firmę amerykańską LightSpace Technology.



Rys. 15. Schemat działania wolumetrycznego wyświetlacza 3D ze skanowanym elektronicznie ekranem oraz przykład projekcji na urządzeniu firmy LightSpace. Źródło: opracowanie własne na podstawie [24]

2.4.3.3 Układy dynamiczne z ekranem pasywnym

Wśród wyświetlaczy wolumetrycznych 3D szeroką grupę stanowią urządzenia ze skanowaniem mechanicznym. Dynamiczne elementy konstrukcyjne mogą, w zależności od podejścia, stanowić pasywny ekran projekcyjny lub ekran aktywny samodzielnie emitujący światło. W rozwiązaniach pasywnych wizualizowane obrazy 3D tworzone są przez synchronizację błysków projektora lub lasera z położeniem ruchomego ekranu rozpraszającego. Zajęta w ten sposób pełna przestrzeń 3D daje widzom wskazówki dotyczące prawdziwej głębi bez specjalnych pomocy wizualnych. Na bazie tej technologii opracowane zostało urządzenie Perspecta 3D [26], które zostało wdrożone na rynek komercyjny, a budowę przedstawiono schematycznie na rys. 16. Wyświetlacz składa się z szybkiego projektora DLP, obracającego się zwierciadła z warstwą dyfuzyjną, układu dopasowującego tor optyczny oraz jednostki sterującej. Trójwymiarowy efekt uzyskuje się przez podzielenie wygenerowanego przez komputer obrazu obiektu trójwymiarowego na niemal dwieście

poszczególnych dwuwymiarowych warstw, wyświetlanych na płaskim okrągłym ekranie wirującym wewnątrz poliwęglanowej przezroczystej kuli. Rozpraszający światło dyfuzor porusza się z szybkością kilkunastu obrotów na sekundę, co przy dwustronnym rzutowaniu na jego płaszczyznę podczas jednego obrotu umożliwia osiągnięcie częstotliwości odświeżania około 30 Hz. Urządzenie jest w stanie tworzyć trójwymiarowe obrazy z dookólnym widokiem zależnym od pozycji widza. Dodatkowymi zaletami tego podejścia do wyświetlania 3D są możliwość projekcji dla wielu użytkowników jednocześnie, duży obszar wyświetlania oraz elastyczność rozmiaru, koloru i kształtu woksela. Pewnym ograniczeniem obrotowych wyświetlaczy pola światła jest rozdzielczość, która zależy przede wszystkim od szybkości odświeżania obrazu generowanego przez projektor. Wysokie wymagania stawiane aktualizacji widoków i prędkości obrotowej ekranu wpływają na minimalizację efektu migotania obrazu.





Rys. 16. Schemat działania wolumetrycznego wyświetlacza 3D ze skanowaniem oraz przykład projekcji na urządzeniu Perspecta 3D. Źródło: opracowanie własne na podstawie strony internetowej virtualworldlets.net oraz [26]

2.4.3.4 Konstrukcje dynamiczne z ekranem aktywnym

Ostatnią grupę w klasyfikacji wyświetlaczy wolumetrycznych 3D stanowią konstrukcje z dynamicznym ekranem wykorzystującym aktywne emitery światła. Wyświetlacze tego typu kontrolując synchronizację adresowania zbioru emiterów światła z położeniem kątowym panelu na którym te emitery zostały umieszczone, są w stanie tworzyć obraz w obrębie powierzchni skanowanej przez matrycę. Rozdzielczość oraz jakość projekcji tego typu systemów jest zależna od liczby i gęstości emiterów światła (najczęściej diod LED) rozmieszczonych liniowo, prędkości obrotowej układu oraz szybkości zmian stanów punktów

świetlnych. Największym wyzwaniem technologicznym opisywanej grupy wyświetlaczy stanowi zapewnienie bardzo wysokiej przepustowości danych transmitowanych do zbioru diod LED, oraz konieczność odświeżania obrazu z dużą częstotliwością, umożliwiającą ograniczenie efektu migotania.

Znane do chwili obecnej rozwiązania, zarówno opracowane niekomercyjnie [41–43] jak i opublikowane w zbiorach patentowych [28-36] nie są co do zasady prawdziwymi wyświetlaczami trójwymiarowymi, ze względu na brak dostarczania fizycznych wskazówek dotyczących głębi. Możliwości prezentowanych przez nie obrazów ograniczają się do tworzenia wizji jednowarstwowej, której powierzchnia w zależności od konstrukcji przyjmuje najczęściej kształt płaszczyzny ograniczonej okręgiem, lub też kształt cylindryczny czy sferyczny. Przytoczone rozwiązania mimo braku możliwości wyświetlania obrazów trójwymiarowych zostały uwzględnione w przeglądzie, ponieważ są urządzeniami zbliżonej klasy konstrukcyjnej do nowoopracowanego modelu LED-owego wyświetlacza kulistego oraz podobnie jak on wykorzystują naturalny mechanizm bezwładności ludzkiego wzroku znany jako "trwałość widzenia" (ang. Persistence Of Vision) [27].

Najprostszą konstrukcją mechaniczną charakteryzują się wyświetlacze generujące obraz na płaskiej powierzchni ograniczonej okręgiem [28-31]. Wirujący układ projekcyjny umieszczony jest bezpośrednio na osi silnika, który odpowiada za wywołanie ruchu obrotowego. Kształt układu przypomina wiatrak, w którego centralnej części znajduje się elektroniczna jednostka sterująca, zaś na ramieniu lub ramionach umieszczono liniowy zbiór aktywnych emiterów światła, najczęściej diod LED. Poszczególne rozwiązania wykazują różnice przede wszystkim w liczbie zastosowanych linijek z aktywnymi punktami świetlnymi (od 1 do 10) oraz w osiąganych parametrach i wymiarach wyświetlanych obrazów. Twórcy publikacji wskazują ponadto odmienne pomysły zastosowań opracowanych urządzeń.

Kolejne ujawniane w publikacjach patentowych wyświetlacze z dynamicznym, aktywnym układem projekcyjnym, przedstawiają bardziej złożone konstrukcje mechaniczne [32-35]. Wynika to z możliwości tworzenia obrazów na powierzchniach sferycznych lub cylindrycznych, co skutkuje zapewnieniem widoczności efektów wizualnych z wielu kierunków jednocześnie. Wirujące części urządzeń zawierają w zależności od rozwiązania jedną bądź kilka linijek z aktywnymi punktami świetlnymi, przy czy w przypadku zastosowania kilku linijek ich odległości od osi obrotu są jednakowe. Zwielokrotnienie linijek skanujących obraz ma na celu głównie poprawienie jakości obrazu lub zmniejszenie prędkości obrotowej wirującego układu.

Ostania publikacja patentowa przedstawia założenia konstrukcyjne urządzenia, którego wirujący układ projekcyjny umożliwiać ma wyświetlenie obrysów nieskomplikowanych kształtów osiowo symetrycznych, lub utworzonych z kilku płaskich linijek emiterów światła, wycinków świetlnych w obszarze skanowania [36]. Urządzenie mimo pewnych podobieństw funkcjonalnych do nowoopracowanego modelu LED-owego wyświetlacza kulistego, nie uwzględnia jakiejkolwiek strony elektronicznej rozwiązania, oraz nie udostępnia wyników działania układu. Urządzenie stanowiące jedynie zamysł mechanicznego układu, wykazuje ponadto znaczące różnice konstrukcyjne, w tym przede wszystkim kształt przestrzeni projekcyjnej.

Należy podkreślić, że ujawnione publikacje patentowe przedstawiają w głównej mierze idee funkcjonalne urządzeń bez przedstawienia możliwości aplikacyjnych.
Ograniczają się do udostępnienia jedynie rysunków konstrukcyjnych, nie prezentując widoków urządzeń podczas aktywnej pracy. Istotne są również daty zgłoszeń wynalazków które przypadają na lata 2014-2020. W zbliżonym okresie nie znając jeszcze wyżej wymienionych publikacji opracowałem w ramach moich prac inżynierskiej i magisterskiej własne warianty działających modeli wyświetlaczy ze skanowaniem mechanicznym i aktywnymi emiterami światła [37, 38]. Można na tej podstawie wnioskować, że poziom rozwijanej przeze mnie technologii wyświetlania, już na etapie projektów poprzedzających urządzeń był w czołówce międzynarodowej.

Opracowane konstrukcje dały podstawę do dalszych badań nad rozwojem opisywanej technologii wyświetlania trójwymiarowego. Wynikami prac projektowych, eksperymentów konstrukcyjnych i wdrożeń innowacyjnych rozwiązań technicznych jest zbudowanie oryginalnego w skali światowej wielowarstwowego, LED-owego wyświetlacza kulistego. Analiza konstrukcyjna urządzenia, sposób jego działania oraz właściwości wpływające na innowacyjność konstrukcji zostaną szeroko opisane w kolejnych rozdziałach pracy.

2.5 Sferyczny wyświetlacz z wirującą linijką LED-ową w wersji 1.0

Prekursorem kulistego wyświetlacza do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej był opracowany w ramach mojej pracy magisterskiej sferyczny wyświetlacz z wirującą linijką LED-ową [37]. Wykorzystując zasadę skanowania mechanicznego, model umożliwia wyświetlanie jednej warstwy obrazu na sferycznej powierzchni. Wyświetlacz składa się z dwóch części: wirującej z aktywnymi punkami świetlnymi i z nieruchomej konstrukcyjnej. Głównym elementem dynamicznego układu urządzenia jest specjalnie zaprojektowana elektroniczny obwód drukowany w kształcie kolistej ramki z rozmieszczoną na połowie krawędzi obwodu linijką diodową. Płyta elektroniczna opiera się na osi wyposażonej w styki złącza obrotowego i napędzana jest przez silnik prądu stałego.

Wirująca półokrągła linijka LED została wyposażona w 48 diod RGB, które, synchronicznie z położeniem kątowym, zmieniają stan 96 razy w czasie obrotu, co zapewnia rozdzielczość matrycy 48x96 [39, 40]. Obok obrazów statycznych, wyświetlacz kulisty ma możliwość wyświetlania animacji składających się z sekwencji obrazów nieruchomych. Złożoność animacji jest uwarunkowana pojemnością pamięci danych wyświetlacza oraz przepustowością bezprzewodowej transmisji danych. Przechowywane i przesyłane przez procesor wyświetlacza do linijki LED obrazy muszą zostać uprzednio odpowiednio przygotowane i zapisane w specyficznym formacie. Czynność ta została zautomatyzowana przez przygotowanie aplikacji w środowisku Matlab, konwertującej dowolny obraz na dane czytelne dla mikrokontrolera wyświetlacza. Algorytm działania polega na wczytaniu w pierwszym kroku dowolnego obrazu z pliku graficznego. Następnie zostaje dopasowana rozdzielczość do wielkości matrycy wyświetlacza oraz głębia bitowa do zastosowanych sterowników wyjściowych. Ostatnim zadaniem jest zapisanie struktury danych i przesłanie jej do pamięci urządzenia. Ze względu na sferyczny kształt generowanego obrazu, jednym z proponowanych zastosowań wyświetlacza jest prezentacja danych (np. ekonomicznych, meteorologicznych, demograficznych itp.) na tle obrazu kuli ziemskiej z kontynentami i oceanami.



Rys. 17. Widok sferycznego wyświetlacza z wirującą linijką LED-ową w wersji 1.0. Źródło: opracowanie własne na podstawie [37, 39, 40]

2.6 Podsumowanie przeglądu

Obrazowanie 3D to interdyscyplinarna technologia, która wykorzystuje rozwiązania z wielu dziedzin technicznych takich jak optyka, elektronika, mechanika, programowanie oraz projektowanie strukturalne. Wyświetlanie projekcji trójwymiarowych jest tylko jednym z elementów całego systemu obrazowania 3D, który obejmuje szereg procesów, w tym akwizycję, przetwarzanie, transmisję, wizualizowanie i wyświetlanie treści 3D. Trójwymiarowe obrazy tworzone są z modeli bryłowych projektowanych komputerowo lub z systemów rejestrujących przestrzenne obiekty. Uzyskane treści muszą być efektywnie przetwarzane przez zaawansowane algorytmy, których optymalizacja pod kątem szybkości wykonywania operacji i obsługi potężnego strumienia danych wpływa na osiągnięcie oczekiwanej jakości wizualizowanych projekcji 3D.

Przegląd aktualnego stanu techniki w zakresie technologii wyświetlania trójwymiarowego jest zagadnieniem złożonym ze względu na konieczność analizy i sklasyfikowania dużej liczby znacząco różniących się konstrukcji optycznych i elektromechanicznych, a także porównania wykorzystanych metod projekcyjnych. Istotnym celem przeglądu jest również ocena wpływu poszczególnych technologii na możliwość postrzegania przez widza głębi obrazu, jego percepcji, komfortu i poprawności postrzegania

przez system wzrokowy. Obecnie opracowywanych jest wiele niezależnych technologii wyświetlania 3D, skupiających się na osiągnięciu kompromisów w zakresie jakości efektu projekcji z możliwościami praktycznego wdrożenia systemu przy użyciu dzisiejszych technologii. Te kompromisy i optymalizacje przekładają się na osiągnięcie charakter-rystycznych właściwości, które w postaci zalet i wad zostały uwzględnione w niniejszym przeglądzie. Opisane technologie uwzględniające podstawowy podział na grafikę komputerową 3D, stereoskopię binokularną i autostereoskopię porównane zostały pod względem możliwości dostarczenia fizycznych i psychicznych wskazówek dotyczących głębi sceny 3D. Ponadto przedstawione zostały typowe wydajności wyświetlania jakie mogą osiągnąć systemy, w tym rozdzielczość przestrzenna, rozmiary ekranu, kąt widzenia obrazu oraz zdolność obsługi określonej liczby widzów.

Przegląd technologii wyświetlania trójwymiarowego należy uzupełnić informacjami dotyczącymi formatów wyświetlania opisywanymi w literaturze jako "projekcje pseudo trójwymiarowe" [44–46]. Należą do nich techniki holograficznych teleobecności na scenie, wyświetlanie pływających obrazów na nośnikach w postaci mgły i chmury cząstek oraz projekcje graficznych wzorów na ścianach wodnych. Systemy te, zwane potocznie "hologramami" nie zostały sklasyfikowane w opracowanym przeglądzie, ponieważ nie są prawdziwymi obrazami 3D opartymi na zasadzie pól świetnych, wolumetrii lub rekonstrukcji frontów świetlnych wykorzystujących interferencję dyfrakcyjną. Warto podkreślić, że metody te mimo że nie dostarczają widzom fizycznych wrażeń dotyczących głębi, są bardzo atrakcyjne dla odbiorów i cieszą się dużym zainteresowaniem rynku medialnego.

Analiza aktualnego stanu techniki z zakresu technologii wyświetlania trójwymiarowego wykonana przede wszystkim w oparciu o zbiór publikacji naukowych, została rozszerzona o przegląd dokumentacji patentowych urządzeń, będących w tej samej klasie konstrukcyjnej do której zaklasyfikowano nowoopracowany model LED-owego wyświetlacza kulistego. Wnikliwy przegląd systemów wyświetlania 3D, a w szczególności wyświetlaczy wolumetrycznych z dynamicznym układem projekcyjnym i aktywnymi emiterami światła wykazał, że istniejące rozwiązania prezentują cechy znacząco różniące się od autorskiego pomysłu wyświetlania. Zapewnia to uznanie oryginalność konstrukcji charakteryzującej się wykorzystaniem wielu linijek LED-owych, różno-odległych od osi obrotu, do wizualizacji w przestrzeni obrazów trójwymiarowych. Przeprowadzona analiza stanowiąca punkt odniesienia do najnowszych rozwiązań w dziedzinie wyświetlania 3D wyznaczyła przestrzeń do realizacji innowacyjnej metody wyświetlania oraz budowy fizycznego modelu potwierdzającego jej skuteczność. W oparciu o zapis ustawy z dnia 14marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 r.), którego art. 13, ust. 1 brzmi następująco:

"Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne,(...) oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata wdanej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej."

określono projektowo konstrukcyjny charakter rozprawy.

2.7 Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest:

opracowanie konstrukcji i oprogramowanie LED-owego wyświetlacza kulistego oraz eksperymentalne zweryfikowanie możliwości zobrazowania rzeczywistości wirtualnej 3D poprzez wizualizację informacji przestrzennej z zastosowaniem mechatronicznego układu wyświetlania kulistego.

Osiągniecie założonego celu pracy zrealizowane zostało poprzez wykonanie następujących zadań szczegółowych:

- 1. Zaproponowano idee projekcji obrazu oraz strukturę modelu funkcjonalnego LEDowego wyświetlacza kulistego
- 2. Opracowano model matematyczny projekcji wirtualnych obrazów
- 3. Zaprojektowano, skonstruowano i mechaniczne uruchomiono LED-owy wyświetlacz kulisty
- 4. Opracowano obwody elektroniczne i oprogramowano mikrokontrolery, zintegrowano moduły mechaniczne i elektroniczne
- 5. Opracowano i uruchomiono oprogramowanie narzędziowe i sterującego wyświetlaczem
- 6. Zbadano możliwości aplikacyjne wyświetlacza

Realizacja wymienionych powyżej celów będzie podstawą do uzasadnienia niżej postawionej tezy mojej pracy:

Możliwe jest opracowanie urządzenia prezentującego obraz wirtualnej rzeczywistości stworzony na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego.

3 Idea projekcji obrazu "LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej"

3.1 Koncepcja konstrukcyjna

Opracowany innowacyjny system (model) trójwymiarowej projekcji obrazu jest autostereoskopowym, wolumetrycznym wyświetlaczem 3D z dynamicznym układem skanowania oraz aktywnymi wokselami. Technika wolumetrycznego wyświetlania umożliwia wizualizacje objetościowych obrazów w rzeczywistej przestrzeni. Każdy woksel, czyli najmniejszy punkt świetlny w strefie projekcji trójwymiarowej jest fizycznie umieszczony w położeniu przestrzennym i emituje światło w wielu kierunkach. Aktywacja odpowiednio zaadresowanych zbiorów wokseli przy możliwości zachowania ich przezroczystości w czasie spoczynku umożliwia kreowanie realnego obrazu w oczach obserwatorów. Układ dynamicznego skanowania w opracowanym modelu opiera swoje działanie na poruszających się trajektorią kołową względem osi obrotu liniach LED-owych. Każda z linii w pojedynczej migawce czasu wyświetla jedną kolumnę obrazu w określonej pozycji w przestrzeni. Odpowiadające za tworzenia czytelnej projekcji diody zapalają się cyklicznie w sposób zsynchronizowany. Układ migających diod powoduje błyski, które podczas ruchu układają się w spójne, czytelne kształty obiektów 3D. Widmo obrazu zostaje postrzegane na zasadzie złudzenia optycznego, czyli nie poprawnej interpretacji obrazu przez mózg człowieka. Zapewnienie wrażenia ciągłości tworzonej wizualizacji możliwe jest dzięki teoretycznej niedoskonałości zmysłu w postaci bezwładności wzroku. Jest to cecha powodujaca opóźnienie w czasie między powstaniem wrażenia wzrokowego u obserwatora, a bodźcem wywołującym to wrażenie oraz powodująca trwanie widzenia po zaniknięciu tego bodźca. Oko po zarejestrowaniu wrażenia wzrokowego, przez krótki czas nie jest w stanie odebrać nowego obrazu. W opracowanym modelu pojawiające się w przestrzeni kolejne kolumny obrazu reprezentowane przez linie LED-owe przy odpowiednio wysokiej prędkości odświeżania łączą się ze sobą, wytwarzając w mózgu obserwatora wrażenie fizycznej obecności obiektów w przestrzeni trójwymiarowej.

Innowacyjnym rozwiązaniem opracowanego modelu, w odniesieniu do istniejących wyświetlaczy z dynamicznym układem skanowania, jest zastosowanie kilku linii LED-owych umieszczonych w różnych odległościach od osi obrotu układu projekcyjnego. Każda z wirujących linii tworzy niezależną warstwę wokseli, które zawieszone w przestrzeni jedna za drugą, pozwalają uzyskać trójwymiarowy obraz z iluzoryczną głębią. Wyróżniającą cechą konstrukcji jest ponadto kulisty kształt obszaru projekcyjnego, który wypełniają sferyczne warstwy punktów świetlnych. Możliwe jest dzięki temu obserwowanie przestrzennych obrazów ze wszystkich stron i dowolnych kątów. Ideę działania kulistego wyświetlacza do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej można scharakteryzować porównaniem jej do widoku obiektu "pokrojonego" na cieniutkie plasterki, przy czym kolejne powierzchnie krojenia zbliżają się do środka obiektu. Wyświetlany obraz składa się więc z "plastrów". Innymi słowy na wirującym ekranie wyświetlane są stosy dwuwymiarowych obrazów, które w sumie tworzą przestrzenny w pełni tego słowa znaczeniu wirtualny obiekt.

3.2 Rzeczywistość wirtualna

Zadaniem opracowanego modelu kulistego wyświetlacza jest prezentowanie obrazu wirtualnej rzeczywistości stworzonej na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego. Rzeczywistość wirtualna to trójwymiarowy obraz, który został stworzony komputerowo. Może przedstawiać różne przedmioty, obiekty, a nawet całe zdarzenia w ruchu. W zależności od koncepcji, rzeczywistość wirtualna opiera się zarówno na elementach świata realnego, jak i całkowicie fikcyjnego. Najprościej można więc powiedzieć, że to określenie oznacza kreowaną cyfrowo imitację (rzeczywistości) świata realnego. Analiza kierunków rozwoju wyróżnia trzy odmienne systemy wirtualnej rzeczywistości [47]. Pierwszym z nich jest wirtualny system pełnego zanurzenia, który umożliwia oddziaływanie na wszystkie zmysły użytkownika. Przeważnie używana jest metoda projekcji obrazu na wyświetlaczu nagłownym, aby uzyskać wrażenie przebywania w wirtualnym środowisku. Kolejny system, zwany niezanurzającym, polega na prezentacji widzowi wirtualnego środowiska przy użyciu monitorów o wysokiej rozdzielczości. Ostatni w klasyfikacji jest system częściowo zanurzający, który wykorzystuje zaawansowaną projekcję graficzną do wyświetlenia w przestrzeni trójwymiarowych obiektów. Odbiorca widzi wirtualne elementy kreowane na otaczającym do planie. Prezentację tego typu rzeczywistości wirtualnej umożliwia opracowana metoda projekcji 3D oraz wykonany na jej podstawie model funkcjonalny kulistego wyświetlacza.

3.3 Właściwości wyświetlacza

Obserwacja wizualizacji trójwymiarowej możliwa jest przez wykorzystanie zarówno fizycznych, jak i psychicznych wskazówek dotyczących głębi, które opisane zostały w pierwszej części pracy. Na ich podstawie możliwe jest scharakteryzowanie właściwości wyświetlanych przez urządzenie obrazów oraz porównanie do innych istniejących metod projekcyjnych. Podstawowa cecha odróżniająca wyświetlacze trójwymiarowe od ekranów dwuwymiarowych jest zapewnienie fizycznych wskazówek głębi. Część autostereoskopowych technik wyświetlania trójwymiarowego oferuje jedynie wskazówki dotyczace paralaksy ruchu i rozbieżności obuocznej. Opracowany model kulistego wyświetlacza należący do grupy wyświetlaczy wolumetrycznych, jest wstanie zapewnić ponadto wymagania dotyczące zbieżności i akomodacji. W związku z tym, podczas obserwacji wyświetlanego obiektu 3D odległość ogniskowania i odległość zbieżności wzroku są jednakowe, przez co nie dochodzi do niespójności wymagań dotyczacych głębi zwanych konfliktem akomodacyjno-zbieżnościowym. Kolejną kluczową właściwością opracowanego modelu jest generowanie wokseli w przestrzeni 3D zamiast na płaskiej lub zakrzywionej powierzchni ekranu. Dzięki temu ludzki narząd wzroku ma możliwość w naturalny sposób dostosować się do oglądanych trójwymiarowych przedmiotów, których elementy znajdują się w różnych odległościach. Jeszcze inną cechą jest zapewnienie płynnej paralaksy ruchu. Podczas poruszania głowa bliższe elementy wydaja się poruszać szybciej niż te, które są dalej. Istnieje zatem możliwość obserwacji obiektów z różnych stron. Następnym ważnym parametrem wydajności i użyteczności wyświetlacza 3D jest kat widzenia. Generowane przez opracowany model obrazy ze względu na kulisty kształt są wyświetlane w pełnym otoczeniu 360°. Obserwacja widoku z określonego punktu zapewnia kąt widzenia bliski 180° zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym.

Przedstawione właściwości opracowanego systemu wpływają na możliwość zakwalifikowania go do technologii wyświetlania trójwymiarowego. Należy również wspomnieć o spodziewanych cechach niepożądanych, które występują w tej metodzie projekcyjnej. Pierwsza z nich, charakterystyczną dla większości wyświetlaczy wolumetrycznych jest nieusuwanie ukrytych linii obiektów w zależności od kata ich obserwacji. Jest to podstawowa właściwość rzeczywistych przedmiotów. Na ekranie kulistego wyświetlacza wszystkie woksele sa widoczne, niezależnie od kierunku, z jakiego patrzy Wyświetlane obiekty wydają się być przezroczyste. W obserwator. niektórych zastosowaniach, takich jak określone aplikacje medyczne do wyświetlania wolumetrycznych zestawów danych, przydatny może być tryb przezroczystego wyświetlania. W większości aplikacji wyświetlanie bez usuwania ukrytych linii może pogarszać dokładność i skuteczność wizualizacji. Kolejną cechą jest ograniczona rozdzielczość trzeciego wymiaru, czyli tego, który wskazuje na głębię obrazu. Opracowana metoda określa maksymalną liczbę warstw obrazu, która jest proporcjonalna do średnicy obszaru projekcyjnego i odwrotnie proporcjonalnie do szerokości oraz grubości linijek LED-owych. Zależność wynika z właściwości geometrycznych konstrukcji oraz konieczności udostępniania swobodnego toru optycznego dla każdej linii LED-owej bez wzajemnego przesłaniania. Skonstruowany model funkcjonalny kulistego wyświetlacza umożliwia generowanie czterech warstw obrazu. Mimo znaczącego ograniczenia rozdzielczości trzeciego wymiaru reprezentuje cechy opracowanej metody wyświetlania trójwymiarowego. Ostatnią znaczącą właściwością niepożądaną modelu jest obecność martwej strefy w środku przestrzeni projekcyjnej. Teoretyczna symulacja opracowanej metody wyświetlania pozwala ograniczyć ją do minimum, jednak w praktycznej realizacji nie jest to możliwe ze względu na mechaniczne ograniczenia.

4 Struktura i własności funkcjonalne LED-owego wyświetlacza kulistego

LED-owy wyświetlacz kulisty, którego opracowanie stanowi główny cel rozprawy, został zbudowany w oparciu o dwie zasadnicze części konstrukcyjne. Nieruchomą podstawę oraz ruchomy układ wirujących linijek LED-owych. Nieruchoma podstawa o kształcie prostopadłościanu zawiera zestaw modułów mechatronicznych, umożliwiających pracę ruchomej, aktywnej części wyświetlacza. Należą do nich układy zasilające, zespół napędowy, moduł sterownia napędem i graficznym interfejsem użytkownika oraz czujnik położenia kątowego. Podstawa utrzymuje wirującą część wyświetlacza za pośrednictwem łożysk kulowych, zapewniając możliwość ruchu obrotowego. Na wale stanowiącym oś obrotu umieszczone jest złącze ślizgowe, dzięki któremu dostarczana jest energia zasilania modułom linijek LED-owych oraz transmitowane są cyfrowe sygnały sterujące. Ruchoma część konstrukcyjna zbudowana jest z układu 4 półokrągłych linijek LED-owych, rozmieszczonych co 90°, zamocowanych wielopunktowo do wału osi obrotu. Każda z nich, ze względu na różniące się wymiary promienia, tworzy podczas ruchu niezależną warstwę obrazu. Linijki LED-owe składają się z obwodów elektronicznych wykonanych na elastycznym laminacie i umieszczone są wewnątrz nadających im kształt profilach aerodynamicznych. W środkowej części wirującego układu znajduje się również moduł komunikacyjny będący bramą wymiany danych między jednostką zewnętrzną a układami linijek LED-owych.



Rys. 18. Budowa LED-owego wyświetlacza kulistego z podziałem na dwie podstawowe części konstrukcyjne. Źródło: opracowanie własne

Przyjęta ogólna struktura konstrukcyjna jest autorskim rozwiązaniem technicznym, powstałym w oparciu o zdobyte doświadczenie. Opracowane w przeszłości wyświetlacze będące pierwowzorami nowo opracowanego modelu umożliwiły wprowadzenie optymalizacji mających na celu osiągnięcie jak najlepszego efektu wizualnego wyświetlanych projekcji.



Rys. 19. Schemat funkcjonalny modułów LED-owego wyświetlacza. Źródło: opracowanie własne

Zaprojektowany model funkcjonalny LED-owego wyświetlacza kulistego ma za zadanie realizować opracowaną koncepcję wyświetlania, wizualizując objętościowe obrazy w przestrzeni. Przyjęte i wdrożone w praktyce parametry urządzenia, określają jego projekcyjne, jednocześnie możliwości wpływajac na charakter prezentowanych treści. W pierwszej kolejności po zdefiniowaniu kształtu przestrzeni projekcyjnej wyznaczono wielkości poszczególnych linijek LED-owych odpowiedzialnych za tworzenie warstw wokseli. Przyjęte wymiary, są ściśle związane z doborem podzespołów elektronicznych m.in. diod LED, sterowników diod i mikrokontrolerów. Należy podkreślić na tym etapie, że opracowana metoda wyświetlania wymaga odświeżania stanów punktów świetlnych z bardzo dużą szybkością rzędu 10 kHz, co przekłada się również na odpowiednio wysoką prędkość transmisji danych. Zestawienie wymagań systemu, z możliwościami technicznymi dostępnych na rynku komponentów elektronicznych wpłynęło na przyjęcie głównych parametrów charakteryzujących skonstruowany model funkcjonalny wyświetlacza. Na podstawie maksymalnych możliwych do osiągnięcia prędkości transmisji i przetwarzania danych, wyznaczono liczbę diod LED, reprezentujących rozdzielczość pionową kreowanego obrazu. Następnie zdefiniowano liczbę przełączeń stanów diod w czasie trwania jednego obrotu, która przekłada się bezpośrednio na wymiar rozdzielczości poziomej obrazu. Otrzymane wartości oraz dobór obudów komponentów elektronicznych na podstawie analizy możliwości technicznych, wpłynął na zdefiniowanie wymiarów linijek LED-owych.

Aktywny obszar projekcyjny opracowanego modelu należącego do grupy wyświetlaczy wolumetrycznych opisany jest powierzchnią sfery zdefiniowaną przez zewnętrzną linijkę LED-ową wykonującą ruch obrotowy. Zamknięta przestrzeń z wyłączeniem strefy martwej wypełniana jest podczas pracy punktami świetlnymi. Ich współrzędne wyznaczone są przez rozdzielczość poszczególnych warstw obrazów oraz promień linijki LED-owej, za pomocą której są generowane. Przyjęta w opracowanym modelu liczba 4 warstw wokseli wynika z wczesnych założeń dotyczących charakteru prezentowanych treści.

Podstawowe paramet kulisty	ry charakteryzujące LED-owy wyświetlacz	Wartość liczbowa
Liczba warstw wokseli	4	
Rozdzielczość	pierwszej warstwy [woksele]	250x130
	drugiej warstwy [woksele]	250x120
	trzeciej warstwy [woksele]	250x110
	czwartej warstwy [woksele]	250x100
Obwód	pierwszej warstwy [mm]	800
	drugiej warstwy [mm]	740
	trzeciej warstwy [mm]	680
	czwartej warstwy [mm]	620
Głębia bitowa koloru [bpv]		21
Częstotliwość odświeżania obrazu [Hz]		30

Tabela. 1. Podstawowe parametry charakteryzujące LED-owy wyświetlacz kulisty. Źródło: opracowanie własne

Skonstruowane urządzenie ze względu na kulisty kształt przestrzeni projekcyjnej zostało opracowane z podstawowym założeniem wyświetlania warstwowych danych geograficznych na tle obrazu kuli ziemskiej z kontynentami i oceanami. Dzięki temu możliwe jest wizualizowanie różnego typu trójwymiarowych map z uwzględnieniem m.in. hipsometrii terenu. Wielowarstwowa struktura obrazu pozwala w wyjątkowo czytelny sposób

przekazywać informacje meteorologiczne, topologiczne, ekonomiczne, demograficzne itp. na planie ziemskiego globu widzianego ze wszystkich stron. Zaprojektowana przestrzeń projekcyjna może być wykorzystana również do wizualizowania sytuacji powietrznej w zastosowaniach wojskowych i cywilnych. Monitorowany ruch samolotów, satelitów i innych obiektów ma przedstawiać nie tylko położenie, ale również relacje wysokościowe. Kombinacja wyświetlanych efektów jest w stanie przekazać kompletną informację przestrzenną, która w tym względzie na tradycyjnych urządzeniach wyświetlających jest mniej czytelna i intuicyjna. LED-owy wyświetlacz kulisty umożliwia prezentację również innych treści, m.in. nieskomplikowanych obiektów 3D i brył geometrycznych.

Skonstruowanie modelu fizycznego poprzedzono opracowaniem matematycznego opisu reprezentującego rzeczywisty obiekt. Przeprowadzono analizę działania metody wyświetlania oraz symulację tworzenia obrazu jedno i wielowarstwowego. Sam proces wizualizacji obrazów trójwymiarowych, zarówno przy użyciu fizycznego modelu, jak i komputerowej symulacji, wymaga przygotowania odpowiednich danych zgodnych z charakterem nowo opracowanej metody. W przypadku głównego zastosowania modelu możliwość pozyskania trójwymiarowych map warstwowych, przekrojów istnieje geograficznych oraz danych położenia obiektów nad ziemią. Na tej podstawie kreowana jest w przestrzeni projekcyjnej oczekiwana treść trójwymiarowa. W przypadku chęci rozszerzenia zastosowań modelu o np. obiekty trójwymiarowe należy odnieść się do złożonego procesu obrazowania 3D, w którego skład wchodzą akwizycja danych trójwymiarowych lub modelowanie 3D, przetwarzanie informacji zgodne z metodą wyświetlania oraz wizualizacja obrazów trójwymiarowych. Opracowany model LED-owego wyświetlacza kulistego umożliwia wyświetlanie obiektów 3D pomimo ograniczonej do 4 warstw głębi obrazu. W związku z tym w części rozprawy poświęconej modelowi matematycznemu został zawarty szczegółowy opis procesu przygotowania danych warstwowych dowolnych treści trójwymiarowych. Przygotowany algorytm przetwarzania danych oraz opracowany model matematyczny umożliwiają przeprowadzenie symulacji wyświetlania 3D z konfigurowalnymi parametrami, takimi jak rozdzielczość oraz liczba warstw obrazu. Na potrzeby skonstruowanego modelu wprowadza sie zgodne z jego fizycznymi wartości parametrami. W celu badania możliwości projekcyjnych opracowanej metody wyświetlania przeprowadzono również symulacje z rozszerzoną rozdzielczością w kierunku głębi obrazu. Efekty zostały przedstawione w podsumowaniu rozdziału poświeconego modelowi matematycznemu.

5 Model matematyczny kulistego wyświetlacza

Sterowanie układem projekcji obrazu kulistego wyświetlacza wymaga wykonania analizy sposobu jego działania. Praktyczna realizacja założeń koncepcyjnych została poprzedzona symulacją komputerową mającą na celu wstępną weryfikację skuteczności, oraz optymalizację algorytmu wyświetlania trójwymiarowych grafik. Reprezentacją obiektu rzeczywistego jest model matematyczny, którego celem jest przedstawienie odpowiedzi dowolnego punktu świetlnego w dziedzinie czasu. Parametrami sterującymi wyjściem są wczytane dane dwu– i trójwymiarowych obrazów. Proces symulacji projekcji z włączeniem akwizycji i przetwarzania danych zostanie opisany w pierwszej części rozdziału. Kolejnym etapem badań opisanym w drugiej części jest przeprowadzenie identyfikacji obiektu fizycznego, jakim jest ruchomy układ wirujących linii LED-owych. Otrzymany dzięki temu dyskretny model umożliwia zaprojektowanie regulatora sterującego silnikiem napędzającym wirujący układ. Zaimplementowanie regulatora w modelu funkcjonalnym umożliwia precyzyjną stabilizacją obrotów, która ma kluczowe znaczenie w osiągnięciu wysokiej jakości obrazu bez przesunięć między kolejnymi klatkami wyświetlanych widoków. Analiza metody wyświetlania oraz symulacje komputerowe zostały przeprowadzone w środowisku Matlab.

5.1 Model wyświetlania obrazu na kulistym wyświetlaczu

Model wyświetlania obrazu na kulistym wyświetlaczu został poprzedzony wprowadzeniem obejmującym akwizycję danych trójwymiarowych oraz przetwarzanie zarejestrowanych informacji, których celem jest przygotowanie treści do wizualizacji przestrzennej. Wymienione procesy są elementami całego systemu obrazowania 3D i muszą być ze sobą ściśle powiązane. Proces akwizycji opisany w rozdziale skupia się na przedstawieniu głównych metod pozyskania danych cyfrowych z rzeczywistych obiektów. Kolejny etap obrazowania, jakim jest przetwarzanie danych, omawia wykorzystany algorytm cięcia modeli 3D na warstwy. Proces zgodny z opracowana koncepcja został zaimplementowany w środowisku Matlab. Kluczowym z punktu widzenia pracy jest ostatni etap czyli wizualizacja przestrzenna. Opisany model matematyczny zawiera analize i symulację układu, skupiając się na wizualizacji zarówno pojedynczego, jak i trójwymiarowego obrazu.



Rys. 20. *System obrazowania 3D z podziałem na powiązane procesy. Źródło: opracowanie własne.*

5.1.1 Metody akwizycji danych trójwymiarowych

Pierwszym etapem umożliwiającym wizualizację przestrzenną jest pozyskanie cyfrowych treści niosących informację o profilach 3D obiektów, współrzędnych punktów na profilach oraz ich położeniu i orientacji w przestrzeni. Możliwe jest wykorzystanie oprogramowania komputerowego do stworzenia modeli bryłowych lub rekonstruowanie otaczającej przestrzeni poprzez przechwycenie kształtów i wyglądu rzeczywistych obiektów. Rejestrowane dane moga być zapisane na kilka sposobów. Pierwszym z formatów jest mapa głębi (ang. Depth Map), którą można traktować jako monochromatyczny, jednokanałowy obraz. Każdy punkt obrazu przechowuje odległość do obiektu w kierunku wyznaczonym przez półprostą wychodzącą z optycznego środka urządzenia obrazującego i przechodzącą przez konkretny piksel na matrycy. Rozszerzeniem formatu jest obraz RGB-D bedacy strukturą danych złożonych z obrazu kolorowego skojarzonego z mapą głębi [49]. Jest to więc format składający się z czterech kanałów -trzech związanych z natężeniem kolorów: czerwonego zielonego i niebieskiego oraz czwartego opisującego głębię. Alternatywnie, informacja o głębi może również być przechowywana w tzw. chmurze punktów (ang. Point Cloud). W reprezentacji tej każdy punkt jest w istocie punktem w przestrzeni kartezjańskiej, opisanym często za pomocą dodatkowych danych, takich jak kolor czy współrzędne wektora normalnego do powierzchni, co ułatwia m.in. fuzję danych z kolejnych chwil czasowych lub z różnych czujników. Chmury punktów mogą być poddane konwersji np. na siatki wielokatów, a następnie modelowane w oprogramowaniu typu CAD lub posłużyć jako plik odniesienia w rozmaitych programach specjalistycznych.

Techniki akwizycji informacji przestrzennej, jak również czujniki rejestrujące, można podzielić na dwie klasy: aktywne i pasywne. Działanie sensorów aktywnych związane jest z emisją dodatkowej energii do środowiska np. poprzez oświetlanie światłem. Czujniki pasywne z kolei bazują jedynie na pasywnie otrzymanej energii, która najczęściej w postaci fotonów po odbiciu od obiektu dociera do przetwornika.

Stereowizja

Główną pasywną techniką otrzymywania informacji przestrzennej jest stereowizja, której działanie stanowi analogię ludzkiego systemu percepcji wizyjnej. Technika opiera się na analizie obrazów pochodzących z minimum dwóch kamer [48]. Obliczenie głębi bazuje na dysparycji, czyli względnej odległości między obrazami tego samego punktu w różnych kamerach. Do głównych etapów stereowizji należą detekcja punktów charakterystycznych, dopasowanie odpowiedników oraz rekonstrukcja współrzędnych 3D. W skanowanym obiekcie rzeczywiste punkty leżące w osi optycznej obrazu jednej kamery przesłaniają się, natomiast są rozróżnialne w obrazie drugiej kamery. Znając współrzędne matryc i orientację obu kamer, można wyznaczyć linie epipolarne badanych punktów oraz ich współrzędne w przestrzeni.

W stereowizji kamery najczęściej ustawia się tak, aby ich osie optyczne były równoległe, dzięki czemu można łatwo wyznaczyć linie epipolarne oraz punkty charakterystyczne [49]. Dodatkowo konieczne jest wstępne przetworzenie obrazów, by przedstawiały widok w taki sposób, jakby płaszczyzny obrazowania kamer były równoległe. Proces ten zwany jest rektyfikacją obrazu. Wymaga on wstępnej kalibracji układu kamer, w wyniku której wyznaczana jest ich pozycja względem siebie oraz parametry wewnętrzne każdej z kamer, takie jak długości ogniskowych i parametry związane ze zniekształceniami wnoszonymi m.in. przez soczewki obiektywu. Proces kalibracji przeprowadza się raz dla danego położenia kamer, po każdorazowej zmianie ich pozycji konieczna jest powtórna kalibracja. Stereowizja bazuje często na analizie obrazu krawędziowego. W związku z tym obiekty o jednolitej, drobnej teksturze lub całkowicie gładkie są słabo lub całkowicie niewykrywalne. W najlepszym wypadku wykrywane są jedynie ich krawędzie, co prowadzi do powstawania dużych, niezidentyfikowanych obszarów w obrazie. Jednym z rozwiązań tego problemu może być zastosowanie dodatkowego projektora wyświetlającego specjalnie przygotowany wzór pokrywający obiekty sztuczną teksturą umożliwiającą poprawę wyników stereowizji. Drugim sposobem poprawy sytuacji jest stosowanie dodatkowego etapu przetwarzania obrazu po wygenerowaniu wstępnej mapy głębi. Po segmentacji obrazu na podstawie koloru wybierane sa obszary jednolite, których głębia interpolowana jest w oparciu o głębię ich krawędzi. Istotną zaletą układów stereowizyjnych w zastosowaniu do pozyskiwania obrazów RGB-D jest idealne wyrównanie mapy głębi z obrazem kolorowym. Mapa niezgodności otrzymywana jest w układzie jednej z kamer, a obliczona na jej podstawie głębia, pokrywa się dokładnie z krawędziami obiektów. Nie ma też efektu tzw. cienia czyli braku głebi wokół obiektu, występującego w czujnikach pracujących w świetle strukturalnym. Z drugiej strony, ponieważ tylko część obrazu w obu kamerach jest wspólna, jedynie dla niej można wyznaczyć głębię. Powoduje to zmniejszenie efektywnego pola widzenia.



Rys. 21. Akwizycja obrazu przestrzennego przy wykorzystaniu metody stereowizji. Źródło:[49]

Światło strukturalne

Inną metodą pomiaru i odtwarzania informacji o głębi sceny, bazującą na analizie obrazu, jest wykorzystanie światła strukturalnego (ang. Structured Light). Na scenę rzucane jest światło formujące znany wzorzec, a kamera umieszczona jest w taki sposób, aby obserwować scenę pod innym kątem niż orientacja rzutnika [32]. Na podstawie odczytanej deformacji wzorca, za pomocą algorytmów bazujących na triangulacji, obliczane są rzeczywiste współrzędne punktów w obrazie. Rzutowane mogą być różne wzorce, zaczynając od pojedynczego punktu, przez wzorce złożone z linii statycznych lub przesuwających się po scenie, aż po złożone, pseudolosowe wzorce monochromatyczne lub kolorowe oraz sekwencje wzorców.

Głównym kryterium przy wyborze konkretnej realizacji skanera opartego na świetle strukturalnym jest charakter analizowanej sceny [30]. W przypadku skanowania obiektów statycznych, najczęściej podczas automatycznego tworzenia modeli trójwymiarowych, możliwe jest zastosowanie sekwencji wzorców, np. prążków Graya. W metodach opartych na sekwencji wzorców obiekt przesuwający się między kolejnymi naświetleniami powoduje zakłamanie wyników. Dlatego do analizy rzeczywistych, dynamicznie zmiennych scen stosuje się jedynie wzorce pojedyncze. Dzięki temu każda klatka obrazu zawiera informacje o całym modelu. Można tu wyróżnić metody oparte na wzorcach kodowanych geometrycznie i kolorowo. W pierwszej z metod stosowane są jednobarwne wzorce geometryczne zakodowane tak, aby poszczególne ich bloki były unikalne w pewnym otoczeniu. W przypadku drugiej metody stosowane są np. różnokolorowe pasy lub szachownice, a z układu kolorów rekonstruowana jest powierzchnia obiektów. Rozwiązania te charakteryzują się dużą szybkością działania, od kilkunastu do ponad stu klatek przetwarzanych w ciągu sekundy. W wielu zastosowaniach, gdy urządzenia rejestrujące mają działać wśród ludzi, wzorce kodowane kolorami są niewygodne ze względu na działanie projektora w paśmie światła widzialnego. W takim przypadku zdecydowanie lepiej sprawdzają się wzorce geometryczne, których rzutniki mogą działać w podczerwieni w sposób niewidoczny i nieprzeszkadzający użytkownikom. Na tej zasadzie działa np. czujnik Kinect firmy Microsoft. Największą niedogodnością związaną z wykorzystaniem obrazowania opartego na rzutowaniu wzorców jest konieczność dokładnego wykrycia tego wzoru. Z tego względu najczęściej stosowane jest ono na niewielkie odległości i przy skanowaniu pojedynczych obiektów. Przy zastosowaniu na większe odległości konieczne jest wykorzystanie projekcji w paśmie podczerwonym, aby wykluczyć zakłócenia od źródeł światła obecnych normalnie w scenie lub zastosowanie projektorów o bardzo dużej mocy. Żaden z wariantów nie sprawdza się jednak na otwartej przestrzeni, gdzie światło słoneczne zakłóca działanie praktycznie wszystkich sensorów tego typu.



Rys. 22. Akwizycja obrazu przestrzennego przy wykorzystaniu światła strukturalnego. Źródło: [50]

Pomiar czasu przelotu sygnału

Inną metodą mogacą realizować trójwymiarową analizę otoczenia jest pomiar czasu przelotu sygnału ToF (ang. Time Of Flight). Istnieje cały szereg różnych czujników działających zgodnie z tą ideą, od najprostszych jednopunktowych dalmierzy laserowych, przez planarne czujniki laserowe aż po dwuwymiarowe matryce kamer ToF [51]. Najbardziej zaawansowane systemy wykorzystywane w aplikacjach wolumetrycznych są w stanie skanować przestrzeń w trzech wymiarach, rejestrując jednocześnie obrazy dwuwymiarowe. Sposób działania kamery ToF polega na pomiarze dystansu, w jakim znajduje się obiekt poprzez rejestrację czasu przelotu wiązki światła [51]. Precyzyjne źródło światła wysyła odpowiednio modulowane impulsy świetlne, których czas trwania to zaledwie nanosekundy. Tak dokładne wymagania co do czasu trwania impulsu wymagają odpowiedniego oświetlenia, a także elektroniki sterującej. Jako źródło światła są dopuszczane zarówno diody LED, jak i źródła laserowe. Kontrolowane muszą być nie tylko intensywność, ale także czas narastania i opadania sygnału, ewentualny błąd o chociażby jedną nanosekundę może spowodować zakłamanie wyniku nawet o kilkadziesiąt centymetrów. Układy sterujące precyzyjnie synchronizują sekwencję otwarcia migawki z pulsowaniem światła tak, aby jak najmniej obcego światła dostało się do sensora. Po zakumulowaniu ładunku jest on odczytywany przez przetwornik analogowo-cyfrowy i przesyłany do jednostki analizującej. Każdy piksel jest źródłem informacji o tym, jak długi był czas oczekiwania na powrót wiązki w danym fragmencie obrazu. Im ten czas był dłuższy, tym dalej znajduje się punkt, od którego się odbiła. Pojedynczy odczyt całej matrycy dostarcza pełnej informacji o obserwowanym obiekcie i daje możliwość wyznaczenia na jej podstawie chmury punktów. Warto podkreślić, że kamery ToF bardzo często mają możliwość rejestracji także konwencjonalnego, kolorowego obrazu, takiego jaki oferują standardowe kamery 2D. Dzięki temu nie ma potrzeby stosowania drugiej, odpowiedzialnej za to kamery. Jest to dodatkowy plus, jeśli chodzi o kompaktowość i funkcjonalność urządzenia i co za tym idzie, także całego potencjalnego systemu wizyjnego. Technologia oparta na pomiarach drogi precyzyjnie modulowanej fali świetlnej ma pewnie ograniczenia. Podstawowym jest negatywny wpływ na dokładność pomiaru każdego innego światła obecnego w przestrzeni roboczej kamery. Dlatego też technologia ToF najwyższa precyzję działania gwarantuje w absolunej ciemności. Obca fala świetlna, pochodząca od innego źródła i propagująca się inną drogą, może zostać odczytana przez sensor kamery jako informacja o obserwowanym obiekcie i przekłamać pomiar. Inna kwestia jest obecność lustrzanych powierzchni w obszarze pomiarowym. Taka sytuacja może także negatywnie wpłynąć na otrzymywane rezultaty. Promienie, które zmierzały poza układ, moga odbić się od takich powierzchni i skierować się w stronę sensora kamery. Wiązka ta wróci do urządzenia, ale pokonując dłuższą odległość niż ta, jaka w rzeczywistości oddziela obserwowany obiekt i sensor. W związku z tym, najkorzystniej wypadaja pomiary matowych powierzchni. Najwyższą dokładnością cechują się pomiary wykonywane w centrum obszaru roboczego kamery, ponieważ na obrzeżach coraz mniej światła wysłanego przez kamerę do niej wraca i dodatkowo wchodzi też pasożytnicze światło. Ważne jest również utrzymywanie temperatury kamery na stałym poziomie.

5.1.2 Proces przetwarzania danych obrazu trójwymiarowego

Akwizycja danych trójwymiarowych jest pierwszym etapem procesu obrazowania 3D. Kolejnym kluczowym krokiem umożliwiającym wizualizację przestrzenną jest przetworzenie zarejestrowanych informacji. Każda technologia wyświetlania trójwymiarowego wymaga przygotowania specjalistycznych struktur danych, zrozumiałych dla układów projekcyjnych. W konstruowanym modelu kulistego wyświetlacza obraz trójwymiarowy jest składową wielu obrazów dwuwymiarowych (opisanych na powierzchniach sferycznych) ułożonych jeden za drugim. Wymagane jest zatem wygenerowanie danych warstwowych, które mają trafić do niezależnych modułów z liniami LED-owymi. Proces "cięcia" lub inaczej "plasterkowania" obrazów objętościowych (ang. Slicing 3D objects) w celu ich wyświetlania jest co do zasady podobny do tworzenia formatu wynikowego w technologiach druku 3D. W obu algorytmach sprawdza się przecięcia obiektów z określonymi płaszczyznami. Punkty wspólne charakterystyczne dla odpowiednich warstw są zapisywane w przeznaczonych do tego formatach. W przypadku pliku wynikowego większości metod drukowania 3D (m.in. metody FDM ang. Fused Deposition Modeling) musi być wskazana kolejność punktów w celu utworzenia ścieżki ruchu urządzenia wykonawczego. Ponadto, w przypadku cięcia modeli powierzchniowych (stereolitograficznych), konieczne jest również wyznaczenie przestrzeni wewnętrznej, która musi zostać wypełniona materiałem podporowym. Innym formatem wyjściowym charakteryzują się dane w opracowanej metodzie wyświetlania. Kolejne warstwy obrazu zapisywane są w tablicach przechowujących informacje zarówno o współrzędnych wokseli jak również ich kolorze.

Proces krojenia jest złożonym zadaniem matematycznym i nie ma jednego rozwiązania tego problemu. Istniejące algorytmy można ogólnie podzielić na wycinanie modeli mozaikowych, które przyjmują jako dane wejściowe siatkę trójkątów np. STL (ang.

Standard Tessellation/Triangulation Language), oraz cięcia bezpośrednie, które działają wprost na bardziej ogólnych modelach CAD, np. NURBS (ang. *Non-Uniform Rational B-Spline)* [53]. Strategia bezpośredniego krojenia może zapewnić dokładniejsze wyniki, unikając błędów wprowadzanych przez triangulację powierzchni. Jednak w niektórych zastosowaniach model obiektowy uzyskuje się już w formie teselowanej tzn. reprezentującej powierzchnię obiektu w postaci siatki wielokątów. Taki format dominuje w zapisie obiektów skanowanych trójwymiarowo bazującym na metodach akwizycji opisanych w poprzednim podrozdziale. Ze względu na jego kompatybilność ze środowiskiem Matlab, będzie on również wykorzystany w symulacji.



Rys. 23. Algorytm krojenia modelu geometrycznego na warstwy obrazów dwuwymiarowych. Źródło: opracowanie własne na podstawie [52, 54]

Przyjęty w pracy (na podstawie [52, 54]) zoptymalizowany algorytm został przedstawiony na rys. 23. W pierwszym kroku zostaje wczytany model w formacie STL,

a następnie przeskanowany w celu uzyskania właściwości, takich jak maksymalna i minimalna liczba wierzchołków, nazwa modelu i liczba profili. Ze względu na to, że prawidłowy model STL powinien znajdować się w dodatniej przestrzeni kartezjańskiej, opracowano funkcję do obsługi przypadków ujemnych wierzchołków, które mogą być tworzone z konwersji CAD do STL lub optymalizacji orientacji bryły. Funkcja wykorzystuje macierz translacji do obliczeń obrotu modelu, przejścia modelu i skalowania modelu. Dzięki temu bryłę STL można odpowiednio zorientować przed procesem krojenia. Następnie wyznaczyć należy liczbę warstw, na jaką ma zostać pocięty model geometryczny oraz wskazać ich wysokości w osi Z. Liczba warstw zależna jest od wymiarów bryły, jak również fizycznej liczby modułów linijek LED-owych odpowiedzialnych za wyświetlanie pojedynczych warstw obrazu. Funkcjonalny model kulistego wyświetlacza prezentuje obraz czterowarstwowy, natomiast symulacje matematyczne przeprowadzono również dla większej liczby warstw. Na etapie wycinania algorytm polega głównie na manipulowaniu danymi profili i porównaniu ze zdefiniowanymi płaszczyznami cięcia, a następnie obliczaniu odcinka linii definiującego kontur warstwy. Segmenty linii to wektory zgodne z zasadą przeciwną do ruchu wskazówek zegara, które zostaną zapisane w pamięci komputera w celu konstruowania konturów. Pocięte segmenty linii są sortowane i łączone w celu utworzenia zamkniętego konturu za pomoca prostego mechanizmu wyszukiwania "od głowy do ogona" z zadaną tolerancja. Tolerancja to maksymalna odległość między łbem a ogonem dwóch łączących się odcinków linii. Wybór wartości tolerancji jest bezpośrednio powiązany z gęstością profili bryły STL. W tym algorytmie maksymalna tolerancja jest równa najkrótszej krawędzi siatki rozpatrywanego modelu geometrycznego.

Ostatni etap procesu przetwarzania danych polega na zapisaniu struktur konturów warstw do formatu map bitowych. Tworzone zostają w ten sposób cyfrowe obrazy w postaci plików wykorzystujących rastrowy sposób reprezentacji grafiki. Format polega na wyznaczeniu położenia każdego piksela obrazu oraz przypisaniu mu wartości określającej składową w danym tonie koloru. Bitmapa przechowuje dane obrazu bez kompresji, dzięki czemu format jest bezstratny.



Rys. 24. Proces przetwarzania danych. Realizacja algorytmu cięcia modelu geometrycznego wykonana w środowisku Matlab. Źródło: opracowanie własne

5.1.3 Model matematyczny wizualizacji jednej warstwy obrazu

Kluczowym, z punktu widzenia charakteru pracy, etapem w łańcuchu obrazowania 3D jest wyświetlanie wizualizacji trójwymiarowej. Prezentowany za pomocą kulistego wyświetlacza obraz wirtualnej rzeczywistości jest efektem wizualizacji w przestrzeni wielu widoków ułożonych jeden za drugim. Pojedynczy widok generowany na planie sfery zostaje postrzegany na zasadzie złudzenia optycznego pojawiającego się w wyniku cyklicznego zapalania i gaszenia diod LED w określonych pozycjach przestrzennych. Wirujący układ ułożonych w linię diod LED, reprezentujący jedną kolumnę obrazu podczas ruchu wypełnia wokselami całą powierzchnię projekcyjną. Stan wyjściowy zaadresowanych punktów świetlnych zależny jest od dostarczonych danych obrazu opracowanych we wcześniejszych etapach procesu obrazowania 3D.



Rys. 25. Wizualizacja układu ułożonych w linię diod LED reprezentujących jedną kolumnę obrazu. Źródło: opracowanie własne



Rys. 26. Symulacja projekcji obrazu w oparciu o metodę skanowania mechanicznego. Wizualizacja umożliwia wyjaśnienie sposobu postrzegania obrazu przez ludzki narząd wzrokowy cechujący się bezwładnością. Źródło: opracowanie własne

W typowym wyświetlaczu dwuwymiarowym takim jak np. CRT lub LCD wyświetlenie statycznego obrazu nie wymaga ciągłego odświeżania. Obserwator będzie wstanie oglądać nieruchomą scenę podczas utrzymania aktualnego stanu wyświetlanego przez układ sterujący ekranem. Aktualizacja wymagana jest przy zmianie klatki obrazu np. w celu przedstawienia ruchu obiektu. W opracowanej metodzie projekcji, opartej na skanowaniu

mechanicznym, ludzki narząd wzrokowy cechujący się bezwładnością, zapamiętuje na bardzo krótki czas układ błysków punktów świetlnych w przestrzeni. Utrzymanie wrażania obecności statycznego obrazu na stałe jest możliwe przy ciągłym odświeżaniu tych samych treści. Aktualizacja wyświetlanych danych musi następować z dużą częstotliwością (~30 Hz), aby obraz postrzegany był na całym obszarze projekcyjnym bez efektu migotania.

Przygotowany na podstawie założeń koncepcyjnych model matematyczny ma na celu opisanie zachowania układu projekcji obrazu kulistego wyświetlacza. Kluczowym elementem jest analiza działania układu linijki diod LED w czasie wykonywania jednego obrotu wokół osi urządzenia. Powielanie funkcji umożliwia zaobserwowanie efektu wizualnego w rzeczywistym układzie. Zaproponowany model matematyczny skupia się na przedstawieniu odpowiedzi dowolnego punktu świetnego w dziedzinie czasu na podstawie dostarczonych danych wejściowych. Odpowiedzą punktu świetlnego 'p' nazywa się wartość tonalną koloru zapisaną w postaci trzech składowych z przestrzeni barw RGB tj, koloru czerwonego, zielonego i niebieskiego. Wartość wyjściowa znajduje się w zakresie zdefiniowanym przez głębię koloru obrazu i jest funkcją parametrów: 'OBRAZ', 'n', 'm', 'f' oraz 't', którą można opisać następującą zależnością:

$$p = F(OBRAZ, n, m, f, t)$$
⁽¹⁾

przy czym poszczególne argumenty oznaczają:

OBRAZ- macierz danych dowolnego obrazu
n- liczba diod LED w układzie liniowym, przyjęta wartość n = 130
m- liczba cykli aktualizacji stanów diod LED na obrót, przyjęta wartość m = 250
f - liczba obrotów linii diod LED na sekundę [Hz], przyjęta wartość f = 30
t- czas [s]

Algorytm wizualizacji jednej warstwy obrazu na wstępie wczytuje do trójwymiarowej tablicy 'OBRAZ' dane obrazu, które są parametrem wpływającym na odpowiedź poszczególnych punktów świetlnych. Następnie pobierane są jego właściwości w postaci m.in. wysokości i szerokości, które umożliwiają wykonanie skalowania. Zmiana rozmiaru ma na celu dostosowanie danych obrazu do rozdzielczości układu projekcyjnego. Wysokość obrazu ma odpowiadać liczbie diod LED w układzie liniowym 'n', natomiast szerokość musi być zgodna z liczbą cykli aktualizacji stanów diod LED na obrót 'm'. Macierz 'OBRAZ' jest więc zapisana w postaci:

$$OBRAZ = \begin{bmatrix} p_{111} & p_{121} & \dots & p_{1m1} \\ p_{211} & p_{221} & \dots & p_{2m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n11} & p_{n21} & \dots & p_{nm1} \end{bmatrix}_{R}, \begin{bmatrix} p_{112} & p_{122} & \dots & p_{1m2} \\ p_{212} & p_{222} & \dots & p_{2m2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n12} & p_{n22} & \dots & p_{nm2} \end{bmatrix}_{G}, \begin{bmatrix} p_{113} & p_{123} & \dots & p_{1m3} \\ p_{113} & p_{223} & \dots & p_{2m3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n13} & p_{n23} & \dots & p_{nm3} \end{bmatrix}_{B} \end{bmatrix}$$

$$(2)$$

Wartość wyjściowa tonu koloru dyskretnego punktu świetlnego przyjmuje postać:

$$p = OBRAZ[i, j, RGB]$$
(3)

przy czym:

 $i \in <1, n >$ $j \in <1, m >$ $RGB \subset (1, 2, 3)$

W celu przedstawienia odpowiedzi dowolnego punktu świetlnego w dziedzinie czasu z uwzględnieniem wszystkich parametrów wejściowych przeprowadzono analizę w oparciu o układ współrzędnych w trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej. Umożliwiło to przypisanie dowolnemu punktowi P jego współrzędnych sferycznych:

- promień wodzący $r \ge 0$, czyli odległość punktu P od początku układu O
- długość azymutalna $0 \le \varphi \le 2\pi$, czyli miara kąta między rzutem prostokątnym wektora \overrightarrow{OP} na płaszczyznę OXY a dodatnią półosią OX
- odległość zenitalna $0 \le \theta \le \pi$, czyli miara kąta między wektorem \overrightarrow{OP} a dodatnią półosią OZ



Rys. 27. Współrzędne punktu w systemie współrzędnych sferycznych. Źródło: strona internetowa pl.wikipedia.org/wiki/Układ_współrzędnych_sferycznych

Indeksy 'i' oraz 'j' zostały opisane zależnościami kątowymi i przyjmują zaokrąglenie w górę do liczb całkowitych:

$$i = \left[\frac{\theta}{\theta_{krok}}\right] \tag{4}$$

$$j = \left[\frac{\varphi(t)}{\varphi_{krok}}\right] \tag{5}$$

przy czym:

$$\theta_{krok} = \frac{\pi}{n} \tag{6}$$

$$\varphi_{krok} = \frac{2\pi}{m} \tag{7}$$

$$\varphi(t) = \varphi_{o+}\omega t, \qquad \omega = 2\pi f$$
(8)

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi f t \tag{9}$$

Zatem ogólna postać odpowiedzi dowolnego punktu na powierzchni sfery opisująca wartości tonalne trzech składowych kolorów RGB przyjmuje następującą formę:

$$p_R(t,\theta) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{0+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], R\right]$$
(10)

$$p_G(t,\theta) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{0+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], G\right]$$
(11)

$$p_B(t,\theta) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{0+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], B\right]$$
(12)

Działanie algorytmu wizualizacji jednej warstwy obrazu wykorzystującego opisany model matematyczny przestawiona rys. 28. Program przygotowany został w środowisku Matlab i zawiera elementy graficznego interfejsu użytkownika GUI (ang. Graphical User Interface). Okno aplikacji w środkowej części ilustruje wczytany obraz po wykonanym skalowaniu. Na obrazie zostały naniesione pionowe markery, pomiędzy którymi znajduje się aktualnie analizowana kolumna obrazu. Jej wybór umożliwia, umieszczony w dolnej części okna, suwak reprezentujący położenie kątowe linii LED-owej w dziedzinie czasu. Odpowiedzi diod w postaci tonu trzech składowych koloru zostały przedstawione w górnej części okna aplikacji. Wartości z zakresu zdefiniowanego przez głębię koloru obrazu są wyświetlone na wykresach dla wszystkich diod jednocześnie.



Rys. 28. Aplikacja obrazująca odpowiedź wszystkich punktów świetlnych przy zadanych parametrach wejściowych. Źródło: opracowanie własne

5.1.4 Model matematyczny wizualizacji trójwymiarowej kulistego wyświetlacza

Rozwinięciem modelu matematycznego opisanego w poprzednim podrozdziale jest analiza zachowania układu wyświetlającego wiele warstw obrazu. Skupia się ona na przedstawieniu odpowiedzi dowolnego woksela w przestrzeni roboczej kulistego wyświetlacza. Dodatkowym elementem w odniesieniu do modelu wizualizacji jednej warstwy obrazu jest uwzględnienie współrzędnej promienia wiodącego 'r'. Niesie ona informację dotyczącą głębi obrazu trójwymiarowego i jest reprezentowana przez stos warstw obrazów dwuwymiarowych opisanych na powierzchniach sferycznych. W ogólnej postaci wartość wyjściową tonu koloru dowolnego punktu świetlnego w przestrzeni projekcyjnej można przedstawić jako funkcję parametrów: $p = F(OBRAZ_3D, n, m, f, t)$ (13)

Parametr **'OBRAZ_3D'** jest wielowymiarową tablicą powstałą w pierwszym etapie działania algorytmu wizualizacji trójwymiarowej. W jej skład wchodzą wszystkie wczytane obrazy dwuwymiarowe w liczbie *s*, wygenerowane w procesie przetwarzania danych, a dokładnie cięcia modelu bryłowego. Przyjmuje ona następującą postać:

Wartość wyjściowa tonu koloru dyskretnego punktu świetlnego przyjmuje postać:

$$p = OBRAZ_3D[i, j, RGB, k]$$
(15)

Indeks 'k' należy do zbioru < 1, s > i przyjmuje wartość zaokrągloną w górę do liczb całkowitych wynikającą z zależności:

$$k = \left[\frac{r}{r_{krok}}\right] \tag{16}$$

przy czym:

$$r_{krok} = \frac{1}{s} \tag{17}$$

Na tej podstawie ogólna postać odpowiedzi dowolnego punktu świetlnego w przestrzeni opisująca wartości tonalne trzech składowych kolorów RGB przyjmuje następującą formę:

$$p_R(t,\theta,r) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{0+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], R, rs\right]$$
(18)

$$p_G(t,\theta,r) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{0+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], G, rs\right]$$
(19)

$$p_B(t,\theta,r) = OBRAZ\left[\left[\frac{\theta \cdot n}{\pi}\right], \left[\frac{(\varphi_{o+}2\pi ft) \cdot m}{2\pi}\right], B, rs\right]$$
(20)



Rys. 29.Symulacja projekcji obrazu trówjwymiarowego powstała w oparciu o model matematyczny. Źródło: opracowanie własne

W celu weryfikacji modelu matematycznego oraz założeń koncepcyjnych została wykonana symulacja projekcji trójwymiarowego obrazu. Aplikacja, której efekt działania prezentuje rys. 29. operuje na danych obrazu przygotowanych w procesie cięcia modelu 3D. Trójwymiarowy obiekt składający się z 20 warstw (s=20) wpisany jest w sferę o promieniu r=1, zaś warstwy obrazu przesunięte są o krok równy $r_{krok}=0,05$. Każdy woksel, tworzący bryłę 3D reprezentowany za pomocą niezależnego punktu, przyjmuje wartości tonalne składowych koloru RGB zależne od parametrów t, θ oraz r. Stan każdego punktu po aktywacji jest zamrożony, aby możliwe było przedstawienie efektu wizualizacji przestrzennej. Aplikacja wykorzystuje do zobrazowania funkcje '*surf*'' oraz '*scatter3*', które w argumentach

przyjmują współrzędne kartezjańskie. Konwersję z układu sferycznego na współrzędne kartezjańskie *x*,*y*,*z* wykonano na podstawie poniższych wzorów:

$$x = x(r, \theta, \varphi) = r \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi \tag{21}$$

$$y = y(r, \theta, \varphi) = r \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \tag{22}$$

$$z = x(r, \theta, \varphi) = r \cdot \sin\theta \tag{23}$$

5.2 Model matematyczny ruchomej części konstrukcji kulistego wyświetlacza

Jak wynika z założeń koncepcyjnych i przeprowadzonej za pomocą modelu matematycznego analizie zachowania układu projekcji obrazu kulistego wyświetlacza, kluczowym zadaniem funkcjonalnym jest zapewnienie stałej prędkości obrotowej wirujących linii LED-owych. Realizacja postawionego warunku umożliwi wygenerowanie jednakowej odpowiedzi punktu świetlnego w ściśle określonym położeniu kątowym podczas wykonywania cyklicznego ruchu. Z punktu widzenia wykreowanego obrazu trójwymiarowego, stabilizacja prędkości obrotowej zapewni powtarzalność wyświetlania kolejnych odświeżanych widoków, a także zapobiegnie efektowi płynięcia lub drżenia obrazu.



Rys. 30. Schemat blokowy układu regulacji napędu wirującej części LED-owego wyświetlacza kulistego. Źródło: opracowanie własne

Moduł sterujący napędem wirującego układu projekcyjnego powinien realizować kilka zadań. Pierwszym jest rozpędzenie ruchomej części konstrukcji według zaplanowanego przebiegu. Następne polega na stabilizacji prędkości obrotowej i podążaniu za ewentualną zmianą prędkości zadanej. Ostatnim zadaniem jest wyhamowanie konstrukcji po zakończeniu projekcji. Działanie wszystkich funkcji modułu sterującego napędem opiera się na układzie regulacji, którego zaprojektowanie umożliwi opracowany model matematyczny. Założony schemat blokowy układu sterowania przedstawiony na rys. 30. korzysta z transmitancji dyskretnej ruchomej części konstrukcji kulistego wyświetlacza. Za względu na nowo opracowany model funkcjonalny urządzenia niezbędna jest identyfikacja modelu matematycznego. Proces identyfikacji przeprowadzony został przy użyciu przeznaczonego do tego oprogramowania, na podstawie odpowiedzi dynamicznej układu napędowego [55].

5.2.1 System Identification Toolbox - Matlab

W celu zbudowania modelu matematycznego ruchomej części kulistego wyświetlacza wykorzystany został dodatek programu Matlab – System Identification Toolbox. Narzędzie służy do budowania modeli systemów dynamicznych z wejściowych i wyjściowych danych pomiarowych. System umożliwia identyfikację transmitancji modelu procesu oraz modelu w postaci równań stanu z wykorzystaniem odpowiedzi w funkcji czasu i częstotliwości. Umożliwia również wstępną analizę czasowych i częstotliwościowych danych (usuwanie offsetu, detrening, wstępne filtrowanie, rekonstrukcję brakujących danych) oraz estymację online parametrów modelu. System Identification Toolbox ma również wiele innych funkcji do przybliżania modeli matematycznych obiektów, zarówno liniowych, jak i nieliniowych.

	<u>×</u>	Operations		Impor	t models	<u> </u>	
mydatae	mydata	Preprocess		tf1 s	sst	P1D	sp100
	0	Working Data					
		Lestimate>	<u> </u>				
Data V	iews	To	То		Model Views	s	
		Workspace LTI	Viewer 🖌 M	odel output	Transi	ient resp	Nonlinear A
Time plot	L						(Company)

Rys. 31. Okno główne modułu System Identification Toolbox. Źródło: opracowanie własne

5.2.2 Identyfikacja modelu ruchomej części kulistego wyświetlacza

Model matematyczny ruchomej części kulistego wyświetlacza został zidentyfikowany na podstawie odpowiedzi skokowej układu. Uwzględniając zaprojektowany moduł sterujący napędem, wejściem i wyjściem układu jest prędkość obrotowa wirującej części konstrukcji. W celu zbadania zachowania układu zadano wartość skokową prędkości, a następnie zarejestrowano jego odpowiedź poprzez odczyt odpracowanej prędkości. Próbkowanie sygnałów wykonano z częstotliwością 100 Hz, zaś czas rejestracji, ustalony na podstawie momentu ustabilizowania obrotów, wyniósł 6 s.

Zebrane w ten sposób dane zostały wprowadzone do oprogramowania Matlab -System Identification Toolbox. Po imporcie przeprowadzono analizę czasową i dokonano wstępnego przetwarzania polegającego na usunięciu offsetu. Następnie estymowano funkcję transferu i model procesu. W wyniku przeprowadzonej identyfikacji wyznaczono wyrażoną wzorem 25 transmitancję operatorową:

$$G(s) = \frac{2.084s + 2.755}{s^2 + 3.439s + 2.738} \tag{25}$$

Rys. 32. przedstawia wynik identyfikacji układu ruchomej części kulistego wyświetlacza. Uwzględniając otrzymane wykresy, można stwierdzić, że identyfikacja została przeprowadzona prawidłowo, ponieważ odpowiedź skokowa układu o zidentyfikowanej transmitancji operatorowej jest zbieżna z odpowiedzią rzeczywistego układu. Otrzymane dane pozwalają na przeprowadzenie symulacji dla uzyskanej transmitancji operatorowej, zapewniając warunki zbliżone do warunków rzeczywistych.



Rys. 32. Wynik identyfikacji układu przedstawiony w oknie modułu System Identification Toolbox. Wykres przedstawiający dane wejściowe w postaci odpowiedzi skokowej układu oraz model wyjściowy. Źródło: opracowanie własne

5.2.3 Regulator cyfrowy PID

Moduł sterujący ruchomą częścią kulistego wyświetlacza wymaga zastosowania regulatora cyfrowego, który umożliwi realizację postawionych zadań. Układ, mimo zmian warunków i zakłóceń otoczenia, powinien charakteryzować się utrzymaniem stałej prędkości zadanej, dlatego też głównym wymaganiem regulatora cyfrowego jest sprowadzenie uchybu do jak najmniejszej wartości. Dodatkowo, ze względu na możliwość zmiany prędkości zadanej podczas pracy, w szczególności podczas rozpędzania i hamowania układu, regulator powinien zapewnić możliwie krótki czas regulacji. Istnieje dopuszczenie do stanu przeregulowania, jednak stabilność powinna być osiągnięta w czasie nie dłuższym niż 3 s. Jednym z najlepszych regulatorów cyfrowych do tego typu zastosowań jest regulator PID, który przy prawidłowym zaprojektowaniu umożliwi osiągnięcie oczekiwanych efektów.



Rys. 33. Schemat blokowy regulatora PID. Źródło: opracowanie własne na podstawie strony internetowej pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_PID

Regulator PID realizuje algorytm:

$$U(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$
(26)

Transmitancja operatorowa idealnego regulatora PID:

$$G_{PID}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$
(27)

Transmitancja operatorowa rzeczywistego regulatora PID:

$$G_{PID}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{K_d} s + 1} \right]$$
(28)

Transmitancja operatorowa regulatora PID zapisana w postaci niezależnej (równoległej):

$$G_{PID}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$
 (29)

gdzie:

K_p - wzmocnienie członu proporcjonalnego

Ki - wzmocnienie członu całkującego

K_d - wzmocnienie członu różniczkującego

T_i - czas zdwojenia

T_d - czas wyprzedzenia

Regulator PID można przekształcić w zależności od zapotrzebowania w regulator:

- a) P (proporcjonalny), ustawiając $T_i=\infty$, $T_d=0$
- b) PD (proporcjonalny różniczkujący), ustawiając $T_i = \infty$
- c) PI (proporcjonalny całkujący), ustawiając $T_d=0$

5.2.4 Dobór parametrów regulatora PID

Projektowany regulator PID został zaimplementowany w środowisku Matlab/ Simulink w celu wykonania strojenia oraz doboru parametrów. Optymalizację układu sterowania poprzez automatyczne dostrajanie wzmocnień regulatora wspomógł wykorzystany dodatek środowiska Matlab - PID Tuner. Na rys. 34. został przedstawiony model układu regulacji z uwzględnieniem zidentyfikowanego modelu obiektu. Blok funkcyjny reprezentujący regulator PID umożliwia określenie typu regulatora oraz wartości nastaw, które mogą zostać wprowadzone manualnie lub z wykorzystaniem automatycznej optymalizacji wykonanej po przekierowaniu do aplikacji PID Tuner.



Rys. 34. Model układu regulacji wirującej części kulistego wyświetlacza

Aplikacja PID Tuner automatycznie dostraja wzmocnienia regulatora PID w systemie SISO (ang. Single – Input Single – Output), aby osiągnąć równowagę między szybkością odpowiedzi a stabilnością. Narzędzie umożliwia określenie typu regulatora, takiego jak PI, PID z filtrem różniczkującym lub regulatora PID o dwóch stopniach swobody (2-DOF). Wykresy analizy pozwalają zbadać wydajność układu regulacji w domenach czasu i częstotliwości. Aplikacja udostępnia interfejs do interaktywnego udoskonalania działania regulatora poprzez dostosowania pasma przeregulowania i zapasu stabilności oraz kompromisu między szybkością śledzenia wartości zadanej a odpornością na zakłócenia.

Etap strojenia w aplikacji PID Tuner został zakończony importem parametrów do modelu układu regulacji w Simulink, w którym dokonano końcowej analizy wyników. Zaprojektowany w ten sposób regulator wraz dobranymi nastawami wzmocnień został zaimplementowany w formie dyskretnej w module sterującym napędem ruchomej części kulistego wyświetlacza. Poprawność zidentyfikowanego modelu matematycznego oraz skuteczność działania układu regulacji zostały potwierdzone w praktycznej realizacji założonych funkcji.



Rys. 35. Wynik strojenia regulatora otrzymany w aplikacji PID Tuner środowiska Matlab. W dolnej części okna aplikacji widoczne wyznaczone współczynniki wzmocnień poszczególnych członów regulatora. Źródło: opracowanie własne

6 Projekt, konstrukcja i uruchomienie LED-owego wyświetlacza kulistego

6.1 Projekt konstrukcji mechanicznej

Opracowanie konstrukcji i uruchomienie LED-owego wyświetlacza kulistego jest jednym z fundamentalnych celów pracy. Na podstawie koncepcji techniki wyświetlania oraz przyjętej struktury zaprojektowany został model funkcjonalny. Urządzenie bazujące na dwóch zasadniczych częściach, nieruchomej podstawie i wirującym układzie linijek LED-owych, zamodelowano w oprogramowaniu CAD. Część elementów składowych, które można pozyskać na rynku, m.in. obudowa, łożyska, elementy napędu, złacze ślizgowe, zostały na wstępie dobrane w oparciu o analizy parametrów mechaniczno - konstrukcyjnych. Następnie zaimportowano udostępnione przez producentów modele 3D lub narysowano odpowiedniki zgodne z kartami charakterystyk. Znaczna część elementów konstrukcyjnych, głównie w ruchomej części urządzenia, wymagała kompleksowego zaprojektowania. Profile utrzymujące i nadającej kształt płytom PCB linijek LED-owych zostały opracowane mając na uwadze aerodynamikę układu. Optymalizacja kształtu wirujących elementów pod kątem przepływu powietrza przekłada się na zmniejszenie oporów ruchu, umożliwiając osiągnięcie oczekiwanych prędkości obrotowych i redukując emitowany hałas. Na podstawie zbioru opracowanych komponentów wykonano model złożeniowy. Odpowiednia konfiguracja relacji i wiązań między elementami umożliwiła przeprowadzenie symulacji ruchu, której celem było wyeliminowanie ewentualnych konfliktów konstrukcyjnych. Zaprojektowane komponenty narażone na przeciążenia poddane zostały badaniom wytrzymałości, dzięki czemu wprowadzono niezbędne modyfikacje zapobiegające ryzyku uszkodzenia urządzenia podczas pierwszych uruchomień.

Projekt konstrukcji mechanicznej powstał przy wykorzystaniu programu do parametrycznego modelowania trójwymiarowego o nazwie SOLIDWORKS CAD 3D. Oprogramowanie oparte jest na jądrze PARASOLID, które generuje geometrię przestrzenną projektowanego detalu. Na podstawie modelu 3D części, możliwe jest wykonanie modeli złożeniowych, rysunków technicznych, symulacji ruchu i obciążenia, animacji i wielu innych. SOLIDWORKS został zaprojektowany do pracy z zespołami złożonymi z kilkunastu tysięcy elementów. Pozwala na zaprojektowanie modeli bryłowych, a także arkuszy blach, konstrukcji spawanych, form, modeli powierzchniowych. Ponadto umożliwia złożenie wszystkich elementów w jeden projekt oraz przygotowanie dokumentacji produkcyjnej. Oprogramowanie SOLIDWORKS to również doskonałe narzędzie do wizualizacji, dzięki czemu projekt rozpoczyna "życie" jeszcze przed jego wyprodukowaniem.

6.1.1 Podstawa LED-owego wyświetlacza kulistego

Podstawę urządzenia kształtuje dobrana aluminiowa obudowa G0478 Gainta o wymiarach 190x190x65 mm. Wewnątrz znajdują się niezbędne podzespoły umożliwiające pracę aktywnej, wirującej części LED-owego wyświetlacza kulistego. Na froncie został przewidziany panel operatorski umożliwiający zarządzanie modelem. W jego skład wchodzi monochromatyczny wyświetlacz LCD o przekątnej 2,4 cala oraz enkoder inkrementalny z przyciskiem. Za obsługę interfejsu użytkownika odpowiada umieszczony wewnątrz układ elektroniczny. W centralnej części podstawy znajdują się dwa zespoły łożyskowe oraz układ napędowy. W skład zespołu łożyskowego wchodzi dobrane łożysko kulowe 6802 2RS o wymiarach 24x15x6 mm oraz zaprojektowany element mocujący, integrujący łożysko z podstawą urządzenia. Oba zespoły utrzymują wirującą część wyświetlacza za pośrednictwem aluminiowego wału o średnicy 15 mm, umożliwiając ruch obrotowy. Za wymuszenie ruchu odpowiada zaprojektowany układ napędowy.

Na wale stanowiącym oś obrotu, między zespołami łożyskowymi, znajduje się złącze ślizgowe (ang. slip ring), przekazujące zasilanie oraz sygnały sterujące. Dobór tego elementu, ze względu na wysokie wymagania konstruowanego urządzenia, nie był zagadnieniem łatwym. Złącza ślizgowe dostępne na rynku charakteryzują się maksymalną prędkością obrotową rzędu 1000 obr/min. Jest to dwukrotnie mniej niż docelowa prędkość układu linijek LED-owych. Ostatecznie zostało wykorzystane złącze ślizgowe H2042-06S firmy Senring Electronics. Podzespół udostępnia 6 kanałów transmisji z możliwym obciążeniem prądowym 2 A. W celu zweryfikowania poprawności jego działania, przeprowadzono badanie dwukierunkowej transmisji sygnału prostokątnego o częstotliwości 1 MHz przez ślizgowe styki złącza, przy prędkości obrotowej przekraczającej nominalną wartość deklarowaną przez producenta. W analizie porównawczej sygnału źródłowego i transmitowanego przez badane złącze nie zaobserwowano zniekształceń. Na tej podstawie potwierdzono możliwość zastosowania w urządzeniu dobranego elementu.



Rys. 36. Podstawa modelu z widocznym układem napędowym, złączem ślizgowym i zespołami łożyskowymi Źródło: opracowanie własne
Wewnątrz podstawy znajdują się również dwa zasilacze układów elektronicznych 230 VAC/12 VDC o wydajności prądowej odpowiednio 10 A i 3 A. Zasilacz większej mocy dostarcza energię układowi elektronicznemu sterującemu napędem oraz graficznym interfejsem użytkownika. Drugi z zasilaczy obsługuje układ linijek LED-owych. Na tylnej ścianie podstawy umieszczono ponadto złącze zasilania sieciowego.

6.1.2 Układ napędowy wirującej części urządzenia

Układ napędowy odpowiada za wymuszenie i utrzymanie zadanej prędkości obrotowej wirującej części LED-owego wyświetlacza kulistego. W skład układu wchodzi silnik prądu stałego oraz przekładnia jednostopniowa z pasem napędowym. Dobór kluczowego elementu układu napędowego, jakim jest silnik uwarunkowany był spełnieniem kryteriów wysokiej sprawności i stosunku mocy do objętości, a także niezawodnej i cichej pracy. W pierwszej kolejności po przeanalizowaniu parametrów rodzajów silników prądu stałego został wybrany silnik bezszczotkowy, BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor) z elektronicznym komutatorem. Główną zaletą tego typu silników w porównaniu do silników szczotkowych jest wysoka trwałość i niezawodność wynikająca z konstrukcji pozbawionej szczotek, które są najczęstszą przyczyną awarii oraz najszybciej zużywającym się elementami mechanicznymi silnika. Dzięki temu jedynymi zużywającymi się elementem są łożyska. Eliminacja szczotek zapewnia cichszą pracę silnika oraz wyższą sprawność energetyczną. Dodatkowo konstrukcja silników bezszczotkowych umożliwia zastosowanie szczelniejszych obudów, gdyż ciepło z cewek może być odprowadzane bezpośrednio poprzez obudowe, co eliminuje konieczność zapewnienia cyrkulacji powietrza. Minusem tego rodzaju silników jest konieczność stosowania specjalnych sterowników elektronicznych, kontrolujących komutacje. Z dostępnego na rynku szerokiego asortymentu silników bezszczotkowych została wybrana jednostka firmy Maxon o oznaczeniu 283838, charakteryzująca się wysoką sprawnością i momentem siły. Silnik ma wbudowany halotronowy układ detekcji położenia rotora, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne sterowanie prędkością obrotową.

W odniesieniu do nominalnej prędkości obrotowej silnika oraz zakładanej prędkości obrotowej układu linijek LED-owych została zaprojektowana przekładnia jednostopniowa. Redukuje ona pięciokrotnie prędkość obrotową, zwielokrotniając moment siły. Przekładnia zbudowana jest w oparciu o dwa koła zębate oraz pas zębaty z podziałką T2,5. Na wale stanowiącym oś obrotu układu linijek LED-owych osadzono koło przekładni o 60 zębach, zaś na wale silnika umieszczono koło o 12 zębach. Oba koła łączy pas napędowy o szerokości 6 mm, którego naciąg regulowany jest za pomocą dedykowanego mocowania silnika.

6.1.3 Czujnik położenia kątowego wirującego układu linijek LED-owych

Osiągnięcie wysokiej jakości obrazu generowanego przez układ projekcyjny LEDowego wyświetlacza kulistego wymaga zastosowania precyzyjnego czujnika położenia kątowego. W metodzie wyświetlania opartej na skanowaniu mechanicznym kluczowe jest zmienianie stanów punktów świetlnych w ściśle określonej pozycji z zachowaniem powtarzalności przy każdym następującym obrocie. W ten sposób możliwe jest uzyskanie kolejnych klatek wyświetlanych obrazów bez przesunięć i efektów rozmycia. Zaprojektowany czujnik położenia kątowego bazuje na mechanicznym układzie modulującym wiązkę, oraz transoptorze szczelinowym. Transoptor zbudowany jest w oparciu o diodę generującą wiązkę światła podczerwonego oraz fototranzystor zmieniający sygnał optyczny na sygnał elektryczny. Mechaniczny układ modulujący wiązkę tworzy tarcza ze szczelinami, która obracając się zmienia sygnał optyczny ciągły na impulsowy. Zaprojektowana wirująca tarcza ma 50 równo rozmieszczonych otworów znajdujących się w okolicy jej obrzeża. Tarcza została zespolona z wałem silnika obracającym się pięciokrotnie szybciej od wału głównego modelu wyświetlacza, na którym umieszczony został układ projekcyjny. W związku z tym, podczas trwania jednego obrotu układu linijek LED-owych, generowanych jest 250 impulsów, przy czym każdy odpowiada za wyzwolenie zmiany stanów punktów świetlnych w odpowiedniej pozycji katowej. Ze względu na osiąganie wysokich obrotów tarcza modulująca została wykonana z wysokogatunkowej stali nierdzewnej o właściwościach sprężystych, czego celem było uniknięcie odkształceń podczas pracy. Model wyświetlacza został ponadto wyposażony w czujnik położenia zerowego bazujący na dodatkowym układzie optoelektronicznym zbudowanym w oparciu o transoptor szczelinowy. Czujnik ten wspomaga działanie systemu, umożliwiając wstępną kalibrację obrazu po uruchomieniu urządzenia oraz wyzwalając kolejne klatki obrazu.



Rys. 37. Budowa układu optoelektronicznego czujnika położenia kątowego. Źródło: opracowanie własne

Zaprojektowanie i wdrożenie w układzie projekcyjnym precyzyjnego czujnika położenia było wynikiem badań przeprowadzonych na wczesnym etapie konstrukcji prototypu i diagnozy przyczyn niedoskonałości powstałego efektu wizualnego. W pierwszym podejściu algorytm bazował jedynie na czujniku położenia zerowego, oraz pomiarze czasu między kolejnymi impulsami. Okres trwania jednego obrotu podzielony przez wartość odpowiadającą rozdzielczości poziomej obrazu, stanowił moment wyzwolenia zmiany stanów punktów świetlnych. Mimo zaimplementowania w układzie sterującym napędem regulatora, którego projekt został przedstawiony w części poświęconej modelowi matematycznemu, sprzętowe ograniczenia mikrokontrolera, m.in. rozdzielczości liczników, wpłynęły na ograniczoną dokładność pomiarów czasów. Pojawiające się niedoskonałości obrazu zostały wyeliminowanie wraz z zastosowaniem precyzyjnego czujnika położenia kątowego.

6.1.4 Wirujący układ linijek LED-owych

Zaprojektowanie wirującego układu linijek LED-owych stanowiło główne wyzwanie konstrukcyjne. Innowacyjny układ mechaniczny musi bowiem charakteryzować się wysoka wytrzymałościa wynikającą z przeciążeń wywołanych ruchem obrotowym, przy jednoczesnym zachowaniu smukłych, aerodynamicznych kształtów profili linijek LEDowych. Całość układu projekcyjnego zamontowano na aluminiowym wale głównym osadzonym w podstawie. Profile linijek LED-owych o owalnym przekroju mocowane są czteropunktowo za pomocą specjalnie zaprojektowanych uchwytów. Dwa skrajne uchwyty łączą końce półkolistych profili, zaś mocowanie stanowiące gwiaździsty wspornik usztywnia konstrukcję w środkowej części profili. Mocowanie centralne zawiera również kanały przewodowe, umożliwiające dystrybuowanie zasilania i sygnałów między modułami elektronicznymi w estetyczny sposób. Profile linijek LED-owych zostały zaprojektowane jako konstrukcje wieloelementowe. Związane jest to z wielkością zaprojektowanych części zaplanowanym procesem wytworzenia prototypu oraz za pomocą druku 3D, a także ograniczeniami rozmiarów pól roboczych drukarek.

Każda z 4 linijek LED-owych charakteryzuje się jednakowym przekrojem profilu, zaś różni się wzajemnie wymiarem promienia ścieżki, po której profil został wyciągnięty. Na rys. 39. został przedstawiony rzut urządzenia z góry z naniesionymi okręgami wyznaczającymi tor ruchu kolejnych linijek LED-owych. Następujące po sobie promienie różnią się wymiarem o 10 mm. Ze względu na to, że wirujący układ projekcyjny nie jest środkowosymetryczny, musi on przed uruchomieniem zostać poddany procesowi wyważania. Efektem procesu jest założenie mas korekcyjnych, których miejsca mocowań zostały przewidziane na etapie modelowania części.



Rys. 38. Widok złożeniowy profili linijek LED-owych wraz z mocowaniami oraz osłoną modułu komunikacyjnego. Źródło: opracowanie własne



Rys. 39. Rzut urządzenia z góry z naniesionymi okręgami wyznaczającymi tor ruchu kolejnych linijek LED-owych. Źródło: opracowanie własne

6.2 Budowa modelu LED-owego wyświetlacza kulistego

Po zakończeniu etapu projektowania i analizy pod kątem wykrycia błędów rozpoczęto proces wytworzenia modelu LED-owego wyświetlacza kulistego. Część podzespołów konstrukcyjnych, które są elementami handlowymi, takich jak np. aluminiowa obudowa, została poddana odpowiednim obróbkom mechanicznym mającym na celu dostosowanie ich do wymagań projektu. Elementy nowo opracowane wykonano z tworzyw sztucznych przy użyciu technologii druku 3D. Dysponując kompletem podzespołów, złożono model, a następnie przeprowadzono uruchomienie oraz wyważanie ruchomej części urządzenia.



Rys. 40. Budowa LED-owego wyświetlacza kulistego. Źródło: opracowanie własne



Rys. 41. Budowa LED-owego wyświetlacza kulistego, wnętrze nieruchomej podstawy. Źródło: opracowanie własne

6.3 Uruchomienie i wyważanie modelu

Konstruowanie urządzenia wirnikowego już na etapie projektowania musi wiązać się z zaplanowaniem procesu wyważania, aby umożliwić uruchomienie sprzętu oraz uniknąć późniejszych uszkodzeń podczas eksploatacji. Wyważanie jest operacją zmniejszania niewyważania za pomocą korekcji masy wirnika. Zabiegowi podlegają zarówno maszyny produkowane seryjnie, jak również ich prototypy. Jest wiele metod niwelowania niewyważenia, jednak na ogół wymagają korzystania ze specjalistycznych, kosztownych urzadzeń, których zakup przekracza możliwości finansowe niewielkich pracowni i laboratoriów. Empiryczna metoda korekcji mas jest czasochłonna i często nie przynosi oczekiwanych efektów. Dodatkowo demontaż wirników w celu wyważenia jest kłopotliwy, a w niektórych przypadkach niemożliwy ze względu na konstrukcję maszyny. Prace operatora dokonującego wyważania znacząco ułatwiło wykorzystanie metody amplitudowo-fazowej, która polega na równoczesnym pomiarze amplitudy oraz fazy drgań wirnika [56, 57]. Do niewątpliwych zalet metody należy możliwość wyważania wirnika w łożyskach własnych maszyny przy jedynie dwóch jej uruchomieniach. Bazując na metodzie amplitudowo-fazowej został opracowany sposób wyznaczenia położenia i wartości masy korekcyjnej dla wirników urządzeń, wymaga on użycia jedynie dwóch czujników pomiarowych oraz oscyloskopu cyfrowego. Pierwszy wykorzystany czujnik - akcelerometr analogowy - umożliwia zbadanie amplitudy drgań, drugi z kolei pozwala wyznaczyć ich fazę. Pomiar i wyświetlanie, a także analizę danych z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera umożliwia oscyloskop cyfrowy [58]. Proces wyważania oparty na metodzie amplitudowo-fazowej i wykorzystaniu wyżej wspomnianego sposobu został wdrożony na modelu kulistego wyświetlacza LEDowego.

6.3.1 Omówienie metod wyważania

Stanem niewyważenia urządzenia wirnikowego nazywamy stan określony takim rozkładem masy, który w czasie wirowania wywołuje zmienne obciążenia na podporach wirnika i jego zginanie. W przypadku wirników sztywnych, na których skupiono się w opracowaniu, jest to równoważne z niepokryciem się centralnej głównej osi bezwładności z osią wirnika. Do podstawowych rodzajów niewyważeń zaliczamy: niewyważenie statyczne, momentowe, quasi-statyczne oraz dynamiczne [59]. Z niewyważeniem statycznym mamy do czynienia, kiedy oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są równoległe. Wyważanie w takim przypadku polega na korekcji masy tylko w jednej płaszczyźnie przechodzącej przez środek ciężkości. Wówczas centralna, główna oś bezwładności jest przesuwana o wartość mimośrodu, aż do jej pokrycia z osią wirnika. Kolejnym rodzajem niewyważenia jest niewyważenie momentowe. Opisuje ono stan, przy którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności przecinają się w środku ciężkości wirnika. Niewyważenie momentowe można zrównoważyć parą mas umieszczonych w dwóch płaszczyznach korekcji. W ten sposób centralna, główna oś bezwładności obraca się względem środka ciężkości o odpowiedni kąt, aż do pokrycia się jej z osią wirnika. Następny typ niewyważania zwanego quasi-statycznym jest złożeniem niewyważenia statycznego oraz momentowego. Masa niewyważenia w wirniku obarczonym tego rodzaju stanem jest

umieszczona w płaszczyźnie poprzecznej nie przechodzącej przez środek ciężkości wirnika. Niewyważenie quasi-statyczne można usunąć za pomocą wyważenia wirnika w jednej płaszczyźnie poprzecznej, której położenie wyznaczone jest z odpowiednich warunków równowagi momentów niewyważeń. Najogólniejszym stanem niewyważenia wirnika jest niewyważenie dynamiczne, w którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są skośne. Niewyważenie zmniejsza się za pomocą wyważania dynamicznego, przy którym rozróżnia się dwa sposoby wyważania: jednopłaszczyznowe i dwupłaszczyznowe.



Rys. 42. Stanowisko do wyważania wirującej części LED-owego kulistego wyświetlacza. Źródło: opracowanie własne

Proces wyważania dynamicznego można zrealizować przy użyciu jednej z trzech metod:

- a) metody amplitudowej, która obejmują metodę prób oraz metodę trzech uruchomień
- b) metody fazowej, do której należy metoda kresek obwodowych
- c) metody amplitudowo-fazowej

Metody amplitudowa i fazowa realizowane są przy użyciu specjalistycznych wyważarek, natomiast metoda amplitudowo-fazowa umożliwia wyważanie wirników w łożyskach własnych maszyny.

Metoda amplitudowa polega na wyznaczeniu wartości kąta niewyważenia za pomocą pomiaru amplitudy drgań łożysk wyważarki przy różnych położeniach masy próbnej na wyważanym wirniku. Wyważanie można podzielić na dwa etapy. Pierwszy to wyznaczenie miejsca mocowania masy korekcyjnej przy jednakowej prędkości obrotowej i jednakowej masie próbnej, lecz przy zmiennym jej położeniu na wirniku. Drugi etap to wyznaczenie wartości masy korekcyjnej przy zachowaniu jednej prędkości obrotowej i niezmiennym kącie mocowania masy próbnej, lecz przy zmiennej wartości tej masy. Metoda znalazła zastosowanie przy wyważaniu małych wirników, tam gdzie nie dysponuje się odpowiednią aparaturą.

Metody fazowe opierają się na założeniu, że przy stałej prędkości obrotowej wyważanego wirnika wartość kąta fazowego między siłą wzbudzającą wywołaną niewyważeniem i największym przemieszczeniem tego wirnika w kierunku poprzecznym do jego osi jest stała i nie zależy od wielkości niewyważenia. Metody te polegają na równoczesnym pomiarze zmiany kąta fazowego oraz wartości amplitud drgań łożyska wyważarki. Ich podstawową zaletą jest możliwość wyznaczenia niewyważenia za pomocą tylko dwóch uruchomień.

Metody amplitudowo-fazowe opierają się na zasadzie równoczesnego pomiaru amplitudy oraz fazy drgań, dając w rezultacie pełny obraz niewyważenia wirnika. Umożliwiają ponadto przeprowadzenie procesu korekcji mas wirników w łożyskach własnych maszyny. Między innymi z tego powodu metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle i została również wykorzystana do wyważenia wirującej części kulistego wyświetlacza LED-owego.

6.3.2 Opis procesu wyważania metodą amplitudowo-fazową z wykorzystaniem układu czujników oraz oscyloskopu cyfrowego

Wyważanie metodą amplitudowo-fazową można przeprowadzić za pomocą dwukrotnego uruchomienia wirnika: pierwszy raz bez masy próbnej i drugi raz z masą próbną. Przy każdym uruchomieniu mierzy się amplitudę i względną zmianę kąta fazowego drgań łożyska znajdującego się najbliżej płaszczyzny korekcji. Przy wyważaniu modelu kulistego wyświetlacza LED-owego wyeliminowano potrzebę stosowania specjalistycznej aparatury. Pomiary zostały wykonane z wykorzystaniem akcelerometru analogowego i transoptora szczelinowego. Wyniki przeanalizowano przy użyciu oscyloskopu cyfrowego wraz z dostępnymi funkcjami matematycznymi.

Do pomiarów amplitudy drgań został wybrany moduł z 3-osiowym akcelerometrem MMA7361L o niskim poborze prądu i zakresie pomiarowym ±6 g [60]. Jedno z wyjść czujnika, dające informację o przyspieszeniu w osi X, zostało podłączone do pierwszego kanału oscyloskopu. Drugim zastosowanym czujnikiem był transoptor szczelinowy TCST1103, który zapewnił odczyt położenia kątowego badanego wirnika, co pozwoliło uzyskać kąt fazowy drgań. Wyjście sensora optycznego połączono z drugim kanałem oscyloskopu. Do zasilenia układu posłużył superkondensator o pojemności 1 F. Po naładowaniu go do 5,5 V umożliwił pracę czujników przez 10 minut. Zastosowanie takiego źródła energii pozwoliło wyeliminować charakterystyczne dla zasilaczy impulsowych szumy, mogące wpłynąć na wyniki pomiarów. Zaletą superkondensatora jest również krótki czas ładowania. Schemat ideowy układu pomiarowego został przedstawiony na rys. 43.



Rys. 43. Schemat ideowy układu pomiarowego procesu wyważania

Kluczowym elementem omawianego systemu do wyważania wirników maszyn jest oscyloskop cyfrowy, który umożliwia pełne zobrazowanie stanu niewyważenia modelu. Do badań został wykorzystany produkt firmy Keysight Technologies, serii DSO1000A/B. Oscyloskop charakteryzuje się częstotliwością próbkowania na poziomie 2 GSPS i pasmem szerokości 60 MHz. Takie parametry w zupełności wystarczają dla omawianego typu badań. Ponadto kolorowy, czytelny wyświetlacz umożliwia bezpośrednią analizę danych, natomiast wbudowany interfejs USB pozwala na zapis do pamięci przenośnej oscylogramów i parametrów pomiarów.

Zgodnie z zasadą wyważania jednopłaszczyznowego unieruchomione zostało jedno z łożysk wirnika. Wirnik, jako ciało sztywne wykonywał drgania wahadłowe wokół środka unieruchomionego łożyska. Przebieg drgań na bieżąco można obserwować na ekranie oscyloskopu. Ze względu na dodatkowe drgania i wibracje układu pomiarowego, pochodzące m.in. z silnika napędzającego wirnik, bezpośredni pomiar amplitudy sygnału był obarczony wyraźnym błędem. Rozwiązaniem problemu okazało się zastosowanie funkcji szybkiej transformacji Fouriera FFT (ang. Fast Fourier Transform). Odpowiednia kalibracja umożliwiła wyświetlenie skutecznej wartości napięcia V_{RMS} w odniesieniu do częstotliwości. Znając prędkość obrotową wirnika, należało jedynie dla odpowiadającej jej częstotliwości odczytać wartość napięcia, która jest wprost proporcjonalna do amplitudy drgań.

Pomiar kąta fazowego drgań umożliwiło sprzężenie oscyloskopu z transoptorem szczelinowym. Na wirniku umocowana została przesłona powodująca wygenerowanie impulsu na wyjściu czujnika w chwili, gdy oba elementy znajdowały się naprzeciwko siebie.

Zobrazowany na oscyloskopie odstęp czasu między impulsem położenia wirnika a szczytem amplitudy drgań w odniesieniu do okresu obrotu pozwolił wyznaczyć kąt niewyważenia.



Rys. 44. Oscylogramy przedstawiające przykładowe przebiegi: A) sygnał drgań z akcelerometru analogowego MMA7361L; B) sygnał położenia wirnika z transoptora szczelinowego TCST1103; C) sygnał drgań transformowany w dziedzinę częstotliwości. Źródło: opracowanie własne

6.3.3 Wyważenie wirującej części kulistego wyświetlacza LED-owego

Bazując na przygotowanym stanowisku pomiarowym, przystąpiono do badań polegających na zdiagnozowaniu parametrów niewyważenia oraz korekcji mas kulistego wyświetlacza LED-owego. Jego wirujący element składa się z umieszczonej w osi obrotu aluminiowego wałka oraz czterech ramion różnej długości wykonanych z tworzywa sztucznego. Na ramionach zostały przewidziane miejsca do mocowania mas korekcyjnych. Ze względu na kształt wirnika charakteryzującego się symetrią względem poziomej płaszczyzny przechodzącej przez środek ciężkości, przyjęto że w układzie rozpatrywany będzie stan niewyważenia statycznego.

Procedura jednopłaszczyznowego wyważania układu została podzielona na kilka etapów. Na wstępie uruchomione zostało urządzenie i po ustabilizowaniu się prędkości na poziomie 600 obr/min odczytano amplitudę oraz fazę drgań. Wielkości utworzyły wektor \vec{W} , który umieszczony został na wykresie współrzędnych biegunowych. Faza wektora odpowiada kątowi przesunięcia między szczytami amplitudy drgań a impulsami położenia wirnika, mierzonego w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wirnika. Amplituda wektora jest natomiast proporcjonalna do amplitudy zmierzonych drgań. Przebiegi sygnałów z zaznaczonymi charakterystycznymi parametrami zostały przestawione na rys. 44.



Rys. 45. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów podczas pierwszego uruchomienia urządzenia (bez masy kalibracyjnej i korekcyjnej). Źródło: opracowanie własne

Drugim krokiem było zamontowanie na wirniku masy kalibracyjnej oraz określenie jej wpływu na drgania. Masa kalibracyjna, zwana masą próbną, powinna być tak dobrana, aby jej położenie spowodowało zmniejszenie, lub przynajmniej nie wpłynęło na zwiększenie amplitudy drgań. Wartość masy kalibracyjnej została oszacowana według wzoru:

$$m_{c} = \frac{0.05 \cdot m_{r} \cdot g}{r_{c} \cdot \omega^{2}}$$
(30)

gdzie:

m_r- masa wirnika [g]; dla badanego układu przyjęto500 g

rc-mimośrodowość zamocowania masy kalibracyjnej [m]; przyjęto 0,1m

ω – częstość obrotowa wirnika [rad/s]; przyjęto 20Π

g – przyspieszenie ziemskie 9,81 m/s 2

m_c– masa kalibracyjna g.

Masa próbna oszacowana na wartość 0,6g została zamocowana po przeciwnej stronie kąta zmierzonego jako faza drgań. Następnie urządzenie zostało uruchomione i po ustabilizowaniu się prędkości obrotowej odczytano na ekranie oscyloskopu charakterystyczne parametry (rys. 46). Wartość amplitudy i fazy drgań utworzyły na wykresie współrzędnych biegunowych wektor \vec{U} . Odejmując od wektora \vec{U} wektor \vec{W} (narysowany na podstawie pierwszego pomiaru), otrzymujemy wektor \vec{Z} , który wyznacza odpowiedź wirnika na dołożoną masę kalibracyjną. Diagram wektorowy przedstawiający wykonane działania został przedstawiony na rys. 47.



Rys. 46. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów podczas drugiego uruchomienia urządzenia (z zamocowaną masą próbną). Źródło: opracowanie własne

Ostatnim etapem, tzw. sprawdzającym, było obliczenie i zamocowanie masy korekcyjnej. Zmiana drgań spowodowana dołożeniem masy korekcyjnej powinna być równa co do wartości i przeciwna w fazie co do drgań zmierzonych w pierwszym przebiegu. Zakładając liniową zależność zmian drgań od wielkości dołożonej masy, można skorzystać ze wzoru:

$$m_k = m_c \frac{|W|}{|Z|} \tag{31}$$

gdzie m_k oznacza masę korekcyjną. Położenie masy korekcyjnej różni się od położenia masy próbnej o kąt równy kątowi między wektorem \vec{Z} , a wektorem \vec{W} . W przypadku badanego obiektu kąt ten wynosił 180°, zaś masa kalibracyjna 0,36 g. Ze względu na to, że masy próbna oraz korekcyjna nie mogły być dodane w wyznaczonym położeniu, podzielono je proporcjonalnie pomiędzy dwa najbliższe miejsca mocowania.



Rys. 47. Układ współrzędnych biegunowych z naniesionym diagramem wektorowym przedstawiającym niewyważenie wirnika. Źródło: opracowanie własne



Rys. 48. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów po zakończeniu wyważania (z zamocowaną masą korekcyjną). Źródło: opracowanie własne

W celu upewnienia się, że układ został właściwie wyważony, zaleca się jego uruchomienie oraz sprawdzenie rezultatów podczas ostatniego pomiaru. Dla badanego modelu rejestracja sygnałów przedstawiona na rys. 48. potwierdza poprawność wykonania procesu korekcji mas. Udowadnia jednocześnie przydatność opracowanego sposobu wyważania.

7 Opracowanie obwodów elektronicznych i oprogramowanie mikrokontrolerów

Skonstruowanie urzadzenia prezentujacego obraz wirtualnej rzeczywistości stworzonego na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego wymaga zaprojektowania specjalistycznych układów elektronicznych. W ich skład wchodzą niezależne dla każdej wirującej linii LED moduły sterujące diodami, moduł zarządzający komunikacją, a także moduł obsługujący napęd ruchomej części wyświetlacza wraz z interfejsem użytkownika. Etap projektowania obwodów drukowanych został poprzedzony analizą i doborem podzespołów zoptymalizowanych pod kątem wymagań funkcjonalnych. Przeprowadzono badania kluczowych elementów w celu weryfikacji właściwości lub ustalenia parametrów nieuwzględnionych przez producentów w charakterystyce produktów takich jak np. bezwładność zapalania i gaszenia diod. Obwody elektroniczne opracowano w zgodności z założoną koncepcją oraz konstrukcją mechaniczną. Architekturę systemu kulistego wyświetlacza zrealizowano w oparciu o założenie wzajemnej komunikacji modułów, łącząc je w bloki funkcjonalne odpowiednio przewodowym, jak i bezprzewodowymi interfejsami. Istotnym do rozwiązania aspektem w opracowanej konstrukcji jest odpowiednio szybkie przetwarzanie ogromu danych. Należy zwrócić uwagę, że obraz złożony z wielu powierzchni wymaga odświeżania około 30 razy na sekundę, aktualizując przy każdym obrocie przeszło sto tysięcy wokseli. Podstawowe zadanie postawione przed mikrokontrolerami z zaimplementowanym algorytmem sterowania punktami świetlnymi jest rozszerzone o dodatkowe wątki w postaci m.in. pobierania ze źródeł danych obrazu i przetwarzania ich. Oprogramowanie mikrokontrolerów bazuje na opracowanych modelach matematycznych, zarówno metody projekcji obrazu, jak i układu regulacji prędkości obrotowej wirującej części kulistego wyświetlacza. Ogół procesów badań i projektowania obwodów elektronicznych, jak również oprogramowania mikrokontrolerów wraz z końcową weryfikacją zostanie opisany w bieżącym rozdziale.

7.1 Dobór podzespołów elektronicznych

Pierwszy etap opracowania obwodów elektronicznych skupia się na analizie funkcjonalnych wymagań projektowanego układu i doborze na tej podstawie podzespołów o oczekiwanych parametrach. Najważniejszym wymaganiem stawianym przed modułami sterujących układem projekcji obrazu jest cykliczne, zsynchronizowanie w czasie wysyłanie pakietów danych do liniowego układu diod LED. Aktualizacja stanów punktów świetlnych odpowiedzialnych za wyświetlenie jednej kolumny obrazu wymusza konieczność przesłania 3,12 kb danych. Wartość ta jest wynikiem mnożenia liczby diod w układzie liniowym oraz głębi bitowej trzech składowych koloru. Wygenerowanie obrazu podczas jednego obrotu linii LED-owej wywołuje 250 zmian stanu każdej diody, co przekłada się na przesłanie przez jednostkę sterującą 780 kb danych. Odświeżanie obrazu z częstotliwością 30 Hz oznacza konieczność zapewnienia minimalnej transmisji danych na poziomie 23,4 Mb/s oraz czasu reakcji punktu świetlnego poniżej 130 us. Przedstawione wymagania oraz szereg innych założeń koncepcji układu projekcyjnego wpłynęły na przeprowadzenie szczegółowej analizy

i badań podzespołów elektronicznych. Dobór kluczowych elementów zostanie scharakteryzowany w kolejnych podrozdziałach.

7.1.1 Dobór i badanie diod LED

Fizyczną reprezentację punktów świetlnych w przestrzeni projekcyjnej kulistego wyświetlacza stanowią diody elektroluminescencyjne - LED (ang. Light-Emitting Diode). Są to półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne emitujące promieniowanie w zakresie światła widzialnego, podczerwieni i ultrafioletu. Działanie diody LED opiera się na zjawisku rekombinacji promienistej, tj. przeskoku elektronu z wyższego poziomu energetycznego na niższy i oddaniu energii w postaci promieniowania. Wywołana pod wpływem czynnika pobudzającego emisja promieniowania elektromagnetycznego, która dla pewnych długości fali przewyższa emitowane przez materię promieniowanie temperaturowe, jest zjawiskiem fizycznym zwanym luminescencją. W diodzie LED mamy do czynienia z elektroluminescencja, przy wytworzeniu której źródłem energii pobudzającej jest prąd elektrycznych dostarczony z zewnątrz. Najefektywniejsza elektroluminescencja w półprzewodniku powstaje w wyniku rekombinacji swobodnych nośników ładunku w złączu p-n, gdy jest ono spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Intensywność świecenia zależy od wartości doprowadzonego prądu, przy czym zależność ta jest liniowa w dużym zakresie zmian prądu. Zjawiska przeszkadzające elektroluminescencji to pochłanianie wewnętrzne i całkowite odbicie wewnętrzne. Długość fali generowanego promieniowania opisuje wzór 32:

$$\lambda = \frac{hc}{W_g} \tag{32}$$

gdzie:

h - stała Plancka

c - prędkość światła

$W_g = W_c - W_v$ -szerokość pasma zabronionego lub różnica poziomów, między którymi zachodzi rekombinacja.

Kolor emisji diody LED zależny jest od jej budowy, a dokładniej rzecz biorąc, od materiału półprzewodnikowego, z jakiego wykonane jest jej złącze p-n. O energii fotonu emitowanego z diody elektroluminescencyjnej decyduje przerwa energetyczna materiału. Przekłada się to na długość fali fotonu, czyli jego kolor. Ze względu na to, że nie można zmieniać przerwy energetycznej w gotowej diodzie, w celu sterowania kolorem emitowanego światła stosuje się diody RGB. W pojedynczej strukturze układ ten zawiera trzy diody: czerwoną (red), zieloną (green) i niebieską (blue). Model barw RGB jest addytywnym modelem, w którym światła: czerwone, zielone i niebieskie mogą być do siebie dodawane w celu odtworzenia szerokiej gamy kolorów.

Dobór odpowiedniej diody do zastosowania w kulistym wyświetlaczu wiąże się z analizą wymagań opracowanego systemu projekcyjnego. Metoda zakłada, że każda dioda umieszczona w wirującej linii LED-owej będzie tworzyć cały wiersz obrazu na powierzchni sfery. Innymi słowy będzie reprezentować 250 wokseli w przestrzeni. Wiąże się to z koniecznością zapewnienia odpowiednio dużego strumienia świetlnego Φ , aby utworzony

obraz charakteryzował się komfortową dla obserwatora jasnością. Kolejnym parametrem diody, na który należało zwrócić uwagę jest kąt emisji światła. Zależy on przede wszystkim od zastosowanej soczewki na wyjściu toru optycznego. Ze względu na kulisty kształt wyświetlacza idealną wartością kąta emisji światła byłoby 180°, zapewniające jednakową jasność obrazu w całym polu widzenia. Uzyskanie takiego parametru nawet poprzez zastosowanie dodatkowych elementów optycznych np. w postaci szkieł dyfuzyjnych jest praktycznie niemożliwe. Mimo tego, przeprowadzone badania wykazały, że wybrane diody o deklarowanym kącie emisji światła 120° umożliwiają wyświetlanie obrazu na sferycznej powierzchni bez wyraźnego spadku jasności w obszarach oddalających się od środka ekranu. Uzyskany efekt jest związany z nieliniowością postrzegania jasności przez ludzkie oko.



Rys. 49. Wykres przedstawiający zależność natężęnia światła względem kąta emisji dla dobranej diody RGB LED. Źródło: karta charakterystyki diody LED Wurth Elektronik 150141M173100 [61]

Innym bardzo ważnym parametrem z punktu widzenia metody projekcyjnej jest czas bezwładności diod. Jak wyznaczono we wcześniejszej analizie reakcja na zmianę sygnału sterującego powinna być krótsza niż 130 us. W kartach charakterystyk większości produkokowanych diod LED ten parametr nie jest uwzględniany, dlatego też wykonano badania czasów włączania i wyłączania wybranych półprzewodników. Pomiar polegał na rejestracji svgnału reprezentujacego nateżenie światła emitowanego w określonym kierunku przez diodę na skutek wymuszenia impulsem elektrycznym. Sygnał sterujący o czasie trwania 200 ns i repetycji 1 kHz został wytworzony przez generator Picotest G5100A. Pomiar impulsów świetlnych struktur odpowiadających za barwy czerwoną, zieloną i niebieską wykonano przy użyciu detektora opracowanego przez firmę CRW Telesystem-Mesko. Urządzenie zbudowane jest w oparciu o lawinowa fotodiode krzemowa oraz przedwzmacniacz o paśmie szerokości 1 GHz. Przebiegi sygnałów zostały zarejestrowane przy pomocy osyloskopu Hameg HMO3524. Rys. 50, 51 oraz 52 przedstawiają oscylogramy z wykonanych badań wybranej diody LED wraz z zapisem pomiaru czasu narastaniai opadania sygnałówreprezentujących natężenie światła. Jak wynika z analizy pomiarów, struktury odpowiadające ze poszczególne barwy charakteryzują się zbliżonymi czasami reakcji wynoszącymi poniżej 100 ns. Wartości te są zatem trzy rzędy niższe niż wyznaczone wymagania.

Na podstawie przeglądu dostępnych na rynku diod LED i analizy pod kątem opisanych parametrów wybrano produkt firmy Wurth Elektronik o numerze referencyjnym 150141M173100 [61]. Istotnym kryterium w analizie była również deklarowana przez producenta powtarzalność wartości mocy świetlnej. Wskaźnik ten ma wpływ na jakość utworzonego za pomocą diod obrazu. Istnieje możliwość kompensacji pojawiających się odchyłek poprzez ograniczenie strumienia świetlnego struktur, dopasowując ich moc świetlna do najmniej intensywnej struktury. Kalibracja tego typu może jednak znacząco ograniczyć maksymalną moc świetlną całego obrazu, co jest niepożądanym efektem ze względu na charakter metody projekcyjnej.



Rys. 50. Wynik badania bezwładności dobranej diody LED dla struktury odpowiadającej za barwę czerwoną. Źródło: opracowanie własne



Rys. 51. Wynik badania bezwładności dobranej diody LED dla struktury odpowiadającej za barwę zieloną. Źródło: opracowanie własne



Rys. 52. Wynik badania bezwładności dobranej diody LED dla struktury odpowiadającej za barwę niebieską. Źródło: opracowanie własne

7.1.2 Sterowanie diod LED

Zadaniem układu sterowania diodą LED RGB jest uzyskanie strumienia światła o wybranym natężeniu i barwie. Regulacje tych parametrów uzyskuje się sterując odpowiednio monochromatyczne komponenty diody emitujące światła czerwone, zielone i niebieskie. Głównymi czynnikami elektrycznymi wpływającymi na pracę diody RGB są prądy świecenia płynące przez jej struktury składowe. Kontrolując te prądy, można zarówno zmieniać proporcje między monochromatycznymi strumieniami światła $\Phi_{\rm R}$, $\Phi_{\rm G}$, $\Phi_{\rm B}$ w celu zmiany barwy strumienia wypadkowego, jak również regulować natężenie emitowanego światła przez odpowiednie jednoczesne zwiekszanie lub zmniejszanie pradów składowych I_{R} , I_G i I_B [64].Wyróżniane sa trzy podstawowe sposoby sterowania strumieniem światła diody LED. Należą do nich modulacja szerokości impulsów, regulacja wysokości piku pradu przy zasilaniu impulsowym oraz regulacja stałoprądowa. Pierwszy sposób polegający na modulacji szerokości impulsów PWM (ang. Pulse-Width Modulation) wykorzystuje całkujące właściwości ludzkiego narządu wzrokowego. Dioda LED sterowana jest sygnałem prostokątnym o regulowanym czasie przełączania i o częstotliwości wyższej niż ta, dla której oko nie zauważa mrugania. Strumień światła jest wprost proporcjonalny do wartości współczynnika wypełnienia impulsu, czyli długości czasu włączenia odniesionego do długości okresu impulsu prostokatnego. W części okresu, gdy dioda jest właczona, jest ona zasilana nominalnym napięciem i powinien przez nią płynąć nominalny prąd. Sterowanie PWM pozwala na uzyskanie liniowej charakterystyki jasności względnej, która ponadto jest niezależna od długości fali emitowanej przez strukturę półprzewodnikową. Niewątpliwą niedogodnością tej metody jest jednak konieczność generowania jednocześnie w wielu kanałach przebiegów prostokątnych o odpowiednio wysokiej częstotliwości i regulowanym współczynniku wypełnienia. W opracowanej metodzie projekcji częstotliwość ta musiałaby osiągnąć wartość rzędu minimun 1 MHz. Oszacowanie wynika z minimalnego czasu aktualizacji stanu diody na poziomie 130 us i zapewnieniu w tym czasie około 100 impulsów prostokątnych, umożliwiając narządowi wzrokowemu uśrednienie wrażenia świetlnego w określonym położeniu kątowym diody LED. Sprzętową realizację postawionych w metodzie wymagań umożliwiają dostępne na rynku rozwiązania. Przykładem jest układ TLC5940 firmy Texas Instruments. W opracowanej konstrukcji jednak przyjęto bardziej optymalny układ sterowania oparty na regulacji stałopradowej.

Innym sposobem kontrolowania strumienia światła diody LED jest regulacja wysokości piku pradu przy zasilaniu impulsowym. W metodzie tej wykorzystywane jest struktury kluczowanie półprzewodnikowej krótkotrwałymi impulsami o wysokiej częstotliwości, dla których wartość pradu przekracza nominalny zakres pracy. Tak zasilana dioda w momencie otrzymania impulsu pradowego emituje światło z kilkukrotnie większą intensywnością niż dioda zasilana standardowo. Ze względu na dużą częstotliwość impulsów narząd wzrokowy, podobnie jak w metodzie PWM, dokonuje sumowania i otrzymywany jest pozorny efekt stałego świecenia. Regulacji natężenia dokonuje się poprzez zmianę wysokości pików prądu. W tej metodzie warunkiem jest, aby całkowita ilość energii, która wydzieli się w diodzie w czasie jednego okresu była porównywalna do lub mniejsza od wartości energii wydzielajacej się w tym samym odcinku czasu przy pracy stałopradowej. W przeciwnym razie żywotność diody zostanie skrócona lub jej struktura ulegnie całkowitemu uszkodzeniu. Ze względu na wysoki stopień skomplikowana układu w przypadku sterowania wieloma kanałami metoda regulacji nie została wykorzystana w opracowanym modelu.

Kontrolowanie strumienia światła diody LED przy użyciu regulacji stałoprądowej opiera się na zastosowaniu źródła prądowego umożliwiającego płynne ustalanie wydajności prądu na wyjściu. W analogowym układzie tego typu elementem regulującym wydatek prądu diody jest potencjometr ustalający prąd bramki tranzystorowego źródła prądowego. W rozwiązaniach cyfrowych możliwe jest wykorzystanie w tym celu przetworników cyfrowo– analogowych, potencjometrów cyfrowych lub specjalistycznych układów scalonych przeznaczonych do sterowania stałoprądowego grupą diod LED. Układem tego typu jest sterownik TLC5922 firmy Texas Instruments wybrany do obsługi diod LED w modelu funkcjonalnym kulistego wyświetlacza [62]. Charakteryzuje się on następującymi cechami:

- obsługa 16 kanałów wyposażonych w sterowane źródła prądowe w zakresie 0–80 mA i dokładności ±1%
- 7-bitowy współczynnik korekcji wartości prądu niezależnie w każdym kanale wyjściowym
- indywidualne włączanie i wyłączanie kanałów wyjściowych
- napięcie zasilania układu 3,0–5,5 V
- napięcie zasilania diod LED do 17 V umożliwiające sterowanie diodami połączonymi szeregowo
- szeregowy interfejs synchroniczny typu SPI, o szybkości do 30 MHz umożliwiający nadrzędnemu mikrokontrolerowi sterowanie pracą układu
- wejście jednoczesnego wygaszania wszystkich kanałów wyjściowych
- możliwość kaskadowego łączenia magistralą SPI większej liczby układów.

Sterując jednocześnie grupą wielu diod LED, istotne jest zapewnienie im identycznych punktów pracy, ponieważ gwarantuje to ich równomierne świecenie. W przypadku wybranego układu, producent gwarantuje różnice wartości prądów regulowanych źródeł prądowych na poziomie ± 1 % w obrębie danego egzemplarza układu scalonego i maksimum ± 4 % w grupie układów scalonych. Są to satysfakcjonujące wartości przy uwzględnieniu rozrzutów parametrów pracy samych diod LED.



Rys. 53. Typowy schemat połączenia mikrokontrolera ze sterownikami TLC5922 w układzie kaskadowym. Źródło: Karta charakterystyki układu scalonego TLC5922 [62]

Dobrany układ TLC5922 umożliwia pracę w trybie autonomicznym, jednak jego właściwe zastosowanie sprowadza się do pracy z nadrzędnym mikrokontrolerem. Dopuszczalny zakres napięć zasilania z przedziału 3,0–5 V pozwala na współpracę układów z mikrokontrolerami nowoczesnymi jak i wykonanymi w starszej technologii. Rekomendowany przez producenta schemat połączenia mikrokontrolera ze sterownikami diod LED w układzie kaskadowym ilustruje rys. 53. Podczas pracy z nadrzędnym procesorem wykorzystuje się wbudowany w układy scalone interfejs SPI-slave, dzięki któremu można przesłać:

- a) 16-bitowe słowo ON-OFF indywidualnie włączające lub wyłączające poszczególne kanały,
- b) 112-bitowe słowo składające się z szesnastu 7-bitowych współczynników programujących prądy *I*outx w każdym z kanałów wyjściowych

a)		OUT15	OUT14	OUT13		OUT2	OUT1	OUT0		
b)										
DC15.6	DC15.5		DC15.0	DC14.6		DC1.0	DC0.7		DC0.1	DC0.0



Do rozróżnienia tych dwóch transmisji służy dodatkowe wejście sterujące MODE. Transmisja kończy się impulsem na wejściu zatrzaskującym XLAT, którego narastające zbocze powoduje zapamiętanie informacji w odpowiednich rejestrach wewnętrznych układu. Następnie na ich podstawie dochodzi do ustalenia prądów w kanałach wyjściowych i wygenerowania określonych strumieni świetlnych przez odpowiadające wyjściom diody LED. Użyty w opracowanej konstrukcji rozszerzony tryb pracy opierający się na 112bitowym słowie sterującym umożliwia indywidualną regulację prądów wyjściowych. Dla każdego z 16 wyjść przewidziane jest 7-bitowe słowo współczynnika DC_x, którego wartość wyznacza aktualny prąd wyjściowy danego źródła prądowego. Regulacja odbywa się w zakresie od 0 mA do wartości I_{OUTMAX} wynikającej z wartości rezystora zewnętrznego R_{IREF}. Podany przedział wartości prądów wyjściowych jest podzielony na 128 równych kwantów. Przy ustalonym dla dobranej diody LED IOUTMAX= 20 mA oznacza to rozdzielczość regulacji prądu równą 156 µA. Jest to wartość w zupełności wystarczająca do precyzyjnego sterowania składowymi prądami diody LED RGB. Dzięki temu zmieniając odpowiednio wartości współczynników DC_X , można kontrolować jasność świecenia diody z jednoczesnym utrzymaniem założonej barwy jej światła. Ze względu na to, że diody LED są elementami nieliniowymi, regulacja jasności poprzez proste skalowanie wartości współczynników DC_X dla barw składowych nie zdaje egzaminu. Konieczne jest zastosowanie dodatkowych przeliczeń wykorzystujących odpowiednio stablicowane charakterystyki $\Phi = f(I_F)$ dla poszczególnych składowych monochromatycznych.



Rys. 55. Charakterystyki zależności jasności świeceniaod prądu diody LED. Źródło: opracowanie własne

Dane katalogowe wybranego układu firmy Texas Instruments podają, że minimalny czas trwania dodatniego impulsu sygnału taktującego interfejs szeregowy (SCLK) wynosi 20 ns, natomiast maksymalna częstotliwość tego sygnału wyznaczony jest na poziomie 30 MHz. W celu zdefiniowania minimalnej wymaganej przez aplikację częstotliwości sygnału taktującego posłużono się wzorem udostępnionym w charakterystyce produktu:

$$f_{SCLK} = 112 \cdot f_{aktualizacji} \cdot n \tag{33}$$

gdzie:

f_{SCLK}- minimalna częstotliwość danych wejściowych sygnałów SCLK i SIN

faktualizacji - częstotliwość aktualizacji całego systemu kaskadowego

n - liczna sterowników TLC5922 układzie kaskadowym.

W opracowanym rozwiązaniu elektronicznym dla najdłuższej linijki LED-owej składającej się ze 130 diod RGB LED obsługiwanej przez 26 układów TLC5922 wyznaczono następującą wartość minimalnej częstotliwości:

$$f_{SCLK} = 112 \cdot (250 \cdot 30) \cdot 26 = 21,84 \, MHz \tag{34}$$

Po przeanalizowaniu schematów układów sterowania i projektów obwodów drukowanych podjęto decyzję o rozdzieleniu transmisji na dwie niezależne magistrale SPI obsługujące odpowiednio górną i dolną część obrazu niezależnego dla każdej warstwy. Działanie ma na celu przede wszystkim podniesienie niezawodności układu elektronicznego, poprzez zmniejszenie liczby węzłów oraz połączeń poszczególnych magistral. Następnie po wyborze

nadrzędnego mikrokontrolera wyznaczono prędkość transmisji danych na 21 Mb/s dla obu magistral SPI.

7.1.3 Dobór nadrzędnych mikrokontrolerów

Tworzony za pomocą kulistego wyświetlacza przestrzenny obraz składający się z kilku warstw obrazów dwuwymiarowych opisanych na powierzchniach sferycznych wymaga zastosowania dla każdego z nich niezależnego układu sterowania punktami świetlnymi. Kontrolujące barwę i strumień światła diod dobrane układy TLC5922 muszą współpracować z nadrzędnym mikrokontrolerem. Jego najważniejszym zadaniem jest zarządzenie strumieniem danych obrazu poprzez ich odczyt ze źródła, buforowanie, przetwarzanie i wysyłanie do jednostek podrzędnych. Zastosowany do realizacji postawionych założeń mikrokontroler musi charakteryzować się, zarówno wydajną jednostką obliczeniową, jak również rozbudowanymi interfejsami komunikacyjnymi i blokami peryferyjnymi. Należy podkreślić ilość bezustannie przetwarzanych danych, które przekraczają wartości rzędu 20 Mb/s. Ponadto każdy mikrokontroler sterujący linijką LED-ową musi realizować funkcje wzajemnej komunikacji oraz synchronizacji, a także obsługiwać przewidziane polecenia wysyłane przez użytkownika.

Na podstawie określonych wymagań i dokonanego przeglądu rynkowego dobrano mikrokontroler STM32f405 firmy ST Microelectronics [63]. Układ oparty jest na wysokowydajnym 32-bitowym rdzeniu ARM Cortex-M4 typu RISC pracującym z częstotliwością do 168 MHz i wykonującym do 210 DMIPS (210 milionów instrukcji na sekundę w teście Dhrystone). Rdzeń Cortex-M4 wyposażono sprzętową jednostkę zmiennoprzecinkową FPU (ang. Floating Point Unit) pojedynczej precyzji, oraz zaimplementowano pełny zestaw jednotaktowych instrukcji wspomagających realizację algorytmów DSP. Mikrokontroler wyposażony jest ponadto w moduł akceleratora pamięci ART (ang. Adaptive Real-Time Accelerator) pozwalający na odczyt pamięci Flash i realizację programu z pełną prędkością taktowania CPU. Akcelerator implementuje w pamięci podręcznej kolejkę pobranych wcześniej instrukcji programu, zapewniając przy tym zerowy czas oczekiwania (0-waitstate) na odpowiedź wolniej taktowanej 128-bitowej pamięci Flash. W mikrokontrolerze zastosowano również jednostkę ochrony pamięci MPU (ang. Memory Protection Unit) zwiększającą bezpieczeństwo aplikacji. Zarządza ona dostępem CPU do pamięci zabezpieczając zasoby jednego zadania przed uszkodzeniem w wyniku działania innego aktywnego zadania. Obszar wbudowanej lub zewnętrznej pamięci rozszerzonej za pomocą interfejsu FSMC (ang. Flexible Static Memory Controller) można podzielić na maksymalnie 64 obszary chronione umożliwiając tym samym zabezpieczenie newralgicznej części kodu przed niewłaściwa ingerencja ze strony innego zadania.

Wybrany mikrokontroler wyposażony jest we wbudowaną pamięć Flash rozmiaru 1 MB służącą do przechowywania programu i danych oraz pamięć systemową bezpośredniego dostępu RAM (ang. Random-Access Memory) rozmiaru 192 kB. Ilość pamięci systemowej zapewnia możliwość buforowania całego obrazu wyświetlanego w czasie trwania jednego obrotu linijki LED-owej, przy zachowaniu wolnych zasobów dla równolegle wykonywanych zadań. Dzięki temu możliwe jest wykonywanie nieskomplikowanych operacji na pełnym obrazie, tuż przed przekazaniem wskaźnika struktury danych do funkcji obsługującej wysyłanie. Optymalizacje przepływu danych zapewnia w mikrokontrolerze 32bitowa macierz magistralowa AHB (ang. Advanced High-performance Bus) umożliwiająca komunikację między blokami peryferyjnymi, interfejsami komunikacyjnymi i pamięcią mikrokontrolera. Wyjątkowo przydatnym z punktu widzenia opracowanej aplikacji jest zintegrowany kontroler bezpośredniego dostępu do pamięci DMA (ang. Direct Memory Access). Umożliwia on zarządzanie transferami danych, tworząc do 8 niezależnych strumieni łaczacych wybrane peryferia i obszary pamięci mikrokontrolera. Współpraca ze strony procesora ograniczona jest do wykonania wstępnej konfiguracji i ewentualnego sterowania cyklami przepływu pakietów danych. Moduł DMA zapewnia maksymalna przepustowość peryferyjna na poziomie sprzętu, umożliwiając w tym samym czasie jednostce CPU niezależna realizację zadań programu. W opracowanej aplikacji kontroler DMA skonfigurowany jest do równoległej obsługi dwóch interfejsów SPI transferujących treść obrazu z pamięci do sterowników diod LED. Ponadto dodatkowym strumieniem pobierane są dane z karty pamięci SD, które zostają wyświetlone w kolejnym cyklu projekcyjnym jako następująca klatka obrazu.



Rys. 56. Budowa mikrokontrolerów z rodziny STM32F4. Źródło: strona intenetowa stm32.eu/2012/07/02/stm32-w-aplikacjach-kryptograficznych/

Mikrokontroler wyposażony jest w rozbudowany zestaw modułów peryferyjnych odpowiadających za komunikację z urządzeniami zewnętrznymi. W ich skład wchodzą

synchroniczne i asynchroniczne interfejsy szeregowe (takie jak UART/USART, SPI, I2C, CAN, SDIO), interfejsy zawansowanej łaczności (USB i Ethernet) oraz równoległe interfejsy wspierające transmisje multimedialne (LCD i DCMI). Do komunikowania się ze sterownikami diod LED wykorzystywane są dwie (z dostępnych trzech) niezależne magistrale SPI pracujące w trybach master z prędkościami 21 Mbit/s. Ponadto interfejs SPI wraz ze sprzętowym modułem sum kontrolnych CRC (Cyclic Redundancy Code) umożliwia obsługę kart pamięci SD/MMC. W opracowanej aplikacji, ze względu na konieczność odczytu danych z bardzo dużymi prędkościami, wybrano do tego zadania inny, przeznaczony do tego celu interfejs SDIO (ang. Secure Digital Input / Output interface). Obsługuje on specyfikacje systemu MMC (ang. Multi Media Card) w wersji 4.2 oraz jest zgodny ze specyfikacją kart pamięci SD w wersji 2.0. Interfejs umożliwia transfer danych z częstotliwością do 48 MHz, udostępniając konfigurację różnych trybów magistrali danych: 1-bitową, 2-bitową i 4-bitową. Jeszcze innym interfejsem wykorzystywanym przez mikrokontrolery w modelu wyświetlacza kulistego jest UART (ang. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Po fizycznym przekształceniu sygnału na różnicowy standard RS485 umożliwia wzajemną komunikacje urządzeń poprzez korzystanie ze wspólnej szyny danych. Do jego zalet należy wysoka prędkość transmisji do 10 Mb/s oraz zgodność z modułami transmisji bezprzewodowej do których należy m.in. układ Bluetooth wykorzystany w projekcie.

Dodatkowymi wykorzystywanymi w mikrokontrolerach układami peryferyjnymi są niezbędne do realizacji programu kontrolery przerwań NVIC (ang. Nested Vectored Interrupt Controller) i EXTI (ang. External Interrupt/Event Controller). Zarządzają one priorytetami i obsługą przerwań pochodzących zarówno z układów wbudowanych, jak i spoza mikrokontrolera. Ponadto w aplikacji wykorzystywane są synchronizowane 32-bitowe układy licznikowe oferujące szeroki zakres konfiguracji oraz porty wejść/wyjść ogólnego przeznaczenia.

Wybór mikrokontrolera z wysokowydajnym rdzeniem i rozbudowanymi układami peryferyjnymi pozwolił na zastosowanie go, nie tylko do sterowania linijkami LED-owymi, ale również w modułach komunikacyjnym i sterującym napędem wirującej części kulistego wyświetlacza. Stosowana przez producenta kompatybilność wyprowadzeń wśród szerokiej rodziny mikrokontrolerów w ramach określonej obudowy zapewnia dodatkową możliwość modyfikacji projektu bez konieczności przeprojektowania obwodów drukowanych.

7.2 Projektowanie obwodów drukowanych

Jednym z zasadniczych zadań w realizacji modelu kulistego wyświetlacza jest opracowanie obwodów drukowanych PCB (ang. Printed Circuit Board). W oparciu o dobrane uprzednio elementy oraz zgodnie z założeniami koncepcyjnymi wykonane zostały odpowiednio schematy układów elektronicznych każdego modułu wchodzącego w skład urządzenia. Na ich podstawie oraz przy uwzględnieniu wytycznych wynikających z konstrukcji mechanicznej zostały opracowane projekty obwodów drukowanych. Po wygenerowaniu plików wyjściowych zlecono wykonanie PCB firmie specjalizującej się w tym zakresie. Następnie po obłożeniu płytek drukowanych elementami elektronicznymi, uruchomiono obwody i przystąpiono do kolejnego etapu w postaci oprogramowania mikrokontrolerów. Cały proces projektowania został wykonany w środowisku Altium Designer.

7.2.1 Środowisko Altium Designer

Altium Designer to zunifikowana aplikacja, która zawiera zbiór technologii i narzedzi niezbędnych do kompleksowej realizacji projektów urządzeń elektronicznych. Środowisko zawiera edytor schematów, edytor PCB z zaawansowanymi narzędziami prowadzenia ścieżek, narzędzia analizy Spice i integralności sygnałów, narzędzia integracji ECAD/MCAD oraz narzędzia zarządzania bibliotekami, danymi projektowymi czy plikami wyjściowymi CAM. Proces projektowania obwodów drukowanych ułatwia zaawansowany edytor trójwymiarowy umożliwiający wirtualne złożenie elementów i wykrywanie kolizji mechanicznych. Aplikacja oferuje wysoki poziom interakcji z danymi obiektowymi programów CAD. Oznacza to między innymi możliwość importu, manipulacji i bezpośredniego sprawdzenia elementów mechanicznych z projektem PCB, co znaczaco ułatwia prototypowanie. Program realizuje projekty z układami FPGA opisanymi w postaci schematu i/lub tekstu języka HDL, umożliwiając również symulację i weryfikację projektów PCB i FPGA. Wspomaga tworzenie i uruchamianie oprogramowania wbudowanego, zarówno dla klasycznych procesorów, jak i software'owych zaimplementowanych w układach FPGA. Ponadto oferuje narzędzia do zarządzania strukturą i dokumentacją projektu, a także wspiera pracę z systemami kontroli wersji.



Rys. 57. Okno programu Altium Designer z aktywnym edytorem trójwymiarowym. Źródło: opracowanie własne

7.2.2 Projekty obwodów linijek LED-owych

Kluczowymi układami elektronicznymi, z punktu widzenia realizowanych przez kulisty wyświetlacz funkcji, są obwody drukowane linijek LED-owych. Wynikający z założeń i konstrukcji mechanicznej kulisty kształt wyświetlacza wymusza dostosowanie zarówno wymiarów, jak i właściwości płyt PCB. Na tej podstawie oraz w ramach optymalizacji ułatwiającej uruchomienie i eksploatację urządzenia zaprojektowano dla każdej sekcji linijki LED-owej dwa obwody drukowane. Pierwszy z nich (o nazwie *"LedLineRGB_(…)")* zawierający diody LED oraz sterowniki TLC5922 wykonano z laminatu grubości 0,4 mm, którego elastyczne właściwości umożliwiły dostosowanie kształtu do półkulistych profili mechanicznych nadających kształt warstwom obrazu.



Rys. 58. Schemat nadrzędny arkusza obwodu linijki LED-owej "LedLineRGB_130". Źródło: opracowanie własne

Wymiar płyty PCB jest zróżnicowany dla każdej sekcji linii LED-owej, jak również zawiera odpowiadającą im liczbę diod LED i układów sterujących. Drugi z pary obwodów drukowanych sekcji (o nazwie *"LedLineCPU"*), zawierający m.in. mikrokontroler i zewnętrzną pamięć, jest zintegrowany z pierwszą płytą PCB ze pomocą złącz sygnałowych. Płyta PCB sprzętowo jest uniwersalna dla każdej linijki LED-owej. Wyświetlony, zróżnicowany obraz każdej warstwy wynika jedynie z odpowiedniej dla każdego mikrokontrolera konfiguracji programu i odmiennych obrazów przechowywanych w pamięci.

Projekty obwodów linijek LED-owych "*LedLineRGB_(...)*" zostały zorganizowane jako struktury hierarchiczne złożone z logicznych bloków zapisanych w formie wieloarkuszowej [65]. Na górze struktury znajduje się nadrzędny arkusz schematu, na którym oprócz podzespołów elektronicznych znajdują się symbole reprezentujące arkusze podrzędne. Taka organizacja projektu zapewnia czytelność, a także zmniejsza rozmiar i ujednolica dokumentację. Projekt wieloarkuszowy linijek LED-owych został utworzony metodą "od dołu do góry". Oznacza to, że w pierwszej kolejności powstał arkusz podrzędny "DriverLED" zawierający pakiet pięciu diod LED RGB wraz z układem sterującym i elementami peryferyjnymi. Następnie na jego podstawie został utworzony symbol na arkuszu nadrzędnym. Warunkiem zapewniającym integrację sygnałów między elementami połączeń.

W projekcie zastosowano ponadto technologię środowiska Altium Designer wspomagającą tworzenie struktur wielokanałowych. Umożliwia ona powielanie identycznych bloków obwodów, zapewniając korzyści w postaci uproszczenia edycji schematu oraz oszczędności czasu przy projektowaniu obwodu drukowanego. Dane wyeksportowane na podstawie tak opracowanych schematów do edytora PCB posegregowane są w bloki zwane "rooms" i grupują poszczególne kanały. Po zaprojektowaniu fragmentu obwodu drukowanego obejmującego elementy jednego kanału możliwe jest skopiowanie właściwości w postaci rozmieszczenia podzespołów i mozaiki ścieżek na wszystkie pozostałe zaimportowane kanały.



Rys. 59. Schemat podrzędnego arkusza "DriverLED" reprezentujący jeden z kanałów na schemacie "LedLineRGB_130". Źródło: opracowanie własne



Rys. 60. Po lewej widok obustronny płyty PCB obwodu "LedLineRGB_100" wraz dołączoną płytą PCB obwodu "LedLineCPU". Po prawej zdjęcie wykonanego profilu mechanicznego z umieszczonymi wewnątrz obwodami elektronicznymi . Źródło: opracowanie własne



Rys. 61. Schemat obwodu "LedLineCPU". Źródło: opracowanie własne

7.2.3 Projekt obwodu modułu sterującego napędem wirującej części wyświetlacza oraz interfejsem użytkownika

Obwód drukowany znajdujący się w nieruchomej podstawie kulistego wyświetlacza zaprojektowany jest do realizacji kilku zadań. Należą do nich między innymi sterowanie napędem i stabilizacja obrotów wirującej części urządzenia, kontrolowanie interfejsu użytkownika i wykonywanie wybranych z menu działań, a także obsługa interfejsów komunikacji przewodowej i bezprzewodowej. Ze względu na jedną z podstawowych funkcji płyta PCB jest zintegrowana z dobranym we wcześniejszym etapie wyświetlaczem LCD oraz enkoderem inkrementalnym. Całość osadzona jest we frontowej części podstawy LED-owego wyświetlacza kulistego, co zapewnia możliwość zarządzania urządzeniem.

Nadrzędnym podzespołem obwodu jest dobrany mikrokontroler STM32f405. Zaawansowana jednostka, wyposażona w wydajny rdzeń oraz rozbudowane peryferia, umożliwia wykonywanie wielu zadań jednocześnie bez opóźnień wpływających na pogorszenie jakości działania urządzenia. Mikrokontroler w jednym z kluczowych zadań zarządza układem sterowania napędu wirującej części wyświetlacza. Ze względu na specyfikę budowy wykorzystany w napędzie bezszczotkowy silnik prądu stałego wymaga zastosowania układu elektronicznego generującego przebieg 3-fazowy o regulowanej częstotliwości, zasilający uzwojenia statora w odpowiedniej kolejności. Pomiar przy pomocy czujników Halla położenia statora względem rotora umożliwia precyzyjne wyznaczenie momentu przełączenia uzwojeń, co przekłada się na uzyskanie najwyższej sprawności oraz poprawnej kontroli prędkości i momentu obrotowego silnika. Istnieją na rynku gotowe sterowniki silników BLDC, jednak nie zapewniają pełnej kontroli parametrów przez jednostkę nadrzędną jak ma to miejsce w układzie dedykowanym, oraz ze względu na gabaryty niemożliwa byłaby ich integracja wewnątrz obudowy. Zaprojektowany moduł sterowania silnikiem oparty został na dobranym w wyniku analizy parametrów i właściwości układzie BTM8962TA firmy Infineon. W ramach jednej obudowy zawiera on układy scalone p-kanałowego i n-kanałowego tranzystora MOSFET oraz sterownik "IC", tworząc zintegrowany półmostek wysokoprądowy. Jednostka umożliwia regulację szybkości narastania prądu, generowanie czasu martwego, diagnostykę prądu czujnikiem Halla oraz zapewnia ochronę przed przegrzaniem, przeciążeniem, zwarciem i przekroczeniem dopuszczalnego napięcia. Opracowany układ sterowania wykorzystuje trzy półmostki BTM8962TA połączone zgodnie ze schematem "EngineController&UI" przedstawionym na rys. 62. Kontrola pracy silnika polega na przesyłaniu przez mikrokontroler trzech przebiegów PWM wpływających na predkość i moment obrotowy oraz przesłaniu sygnałów załączenia i rozłączenia par kluczy zapewniających właściwą komutację. Generowane sygnały prostokątne o modulowanej szerokości obsługiwane są sprzętowo przez trzy kanały jednego z liczników mikrokontrolera. Liczniki mają ponadto zaawansowane tryby pracy, które wspierając m.in. odczyt pozycji z enkoderów inkrementalnych oraz sensorów opartych na efekcie Halla. Ostatnia z wymienionych właściwości jednego z liczników mikrokontrolera została użyta do odczytu informacji zwrotnej o pozycji rotora sterowanego silnika BLDC. Zapisana na trzech kanałach sześciostanowa wartość licznika umożliwia po wygenerowaniu przerwania w momencie zmiany stanu przełączenie cewek statora, które następuje co 1/6 obrotu. Zamknięta pętla sterowania oparta o sygnały z czujników Halla zapewnia precyzyjną kontrolę silnika w pełnym zakresie prędkości.

W przypadku użycia większości wyprowadzeń mikrokontrolera Projekt obwodu drukowanego wymaga szczególnego zorientowania na przyporządkowanie portów wyjściowych odpowiednim układom zewnętrznym. Umożliwia to maksymalne wykorzystanie sprzętowych modułów peryferyjnych mikrokontrolera zapewniając tym samym jednostce CPU czas na realizację innych zadań. Przewidziana w dobrany procesorze możliwość konfiguracji alternatywnych wyjść większości układów peryferyjnych podnosi swobodę projektową. Ponadto opracowane przez producenta oprogramowanie narzędziowe CubeMX usprawnia zarządzanie konfiguracją mikrokontrolera umożliwiając eksport ustawień do środowiska programistycznego w postaci kodu języka C.



Rys. 62.Schemat obwodu "EngineController&UI". Źródło: opracowanie własne



Rys. 63. Schemat podrzędnego arkusza "HalfBridgeCurrent" reprezentujący jeden z kanałów na schemacie"EngineController&UI". Źródło: opracowanie własne



Rys. 64.Widok płyty PCB obwodu"EngineController&UI", oraz zdjęcie frontu obudowy z interfejsem użytkownika. Źródło: opracowanie własne

7.2.4 Projekt obwodu modułu komunikacyjnego

Moduł komunikacyjny w modelu kulistego wyświetlacza tworzy kanały transmisji danych między wirującymi linijkami LED-owymi a modułem sterującym znajdującym się w nieruchomej obudowie lub jednostką zewnętrzną np. komputerem. Zbudowany jest w oparciu o moduł Bluetooth, który współpracuje bezpośrednio z transceiverem RS485. Przesyłanie danych w standardzie różnicowym w obrębie wirującej części urządzenia umożliwia bezkonfliktową komunikację ze wszystkimi mikrokontrolerami. Typowa magistrala szeregowa RS485 została rozbudowana o dodatkowy bezprzewodowy węzeł, który jest ponadto urządzeniem nadrzędnym w transmisji. Kontrolery linijek LED-owych sprawują w zaprojektowanej konfiguracji funkcję urządzeń podrzędnych. Podsumowując, moduł komunikacyjny pełni rolę konwertera sygnału bezprzewodowego na sygnał różnicowy w standardzie RS485.

Druga funkcja opisywanego obwodu elektronicznego jest impulsowa stabilizacja napięcia do wartości 3,3 V, z którą pracują układy elektroniczne wszystkich obwodów w wirującej części urządzenia. Przetwornica napięcia zasilana jest energią z zasilacza impulsowego o napięciu wyjściowym 12 V, który znajduje się w nieruchomej obudowie urządzenia. Umieszczenie układu stabilizacji napięcia za złączem obrotowym ma dwie podstawowe zalety. Pierwszą z nich jest kilkukrotne zmniejszenie wartości przesyłanego prądu, co ułatwiło dobór właściwego złącza obrotowego i wpływa na wydłużenie żywotności ruchomych styków. Drugą zaletą zaprojektowanej topologii zasilania jest ograniczenie wpływu zakłóceń mogących wystąpić na stykach złącza ślizgowego i osiągnięcie stabilnej wartości wyjściowej napięcia mimo szybkich zmian prądu obciążenia układów odbiorczych. Na podstawie oszacowanej maksymalnej, wynoszącego ok. 2.5 A, wartości pradu pobieranego przez obwody linijek LED-owych dobrano impulsowy regulator obniżający napięcie A8498 firmy Allegro Microsystems. Układ charakteryzuje się wydajnością prądową 3 A i wysoką sprawnością wynoszącą ponad 80%. Ponadto obsługa szerokiego zakresu napięć wejściowych oraz regulacja napięcia wyjściowego umożliwia skonfigurowanie układu zgodnie z wymogami projektowanego obwodu.

Płyta PCB modułu komunikacyjnego została zaprojektowana na planie koła i umieszczona wewnątrz wykonanej obudowy w środkowej części kulistego wyświetlacza. Osadzone na obrzeżu płyty złącza umożliwiają dystrybucję zasilania i przekazywanie sygnałów do wszystkich obwodów linijek LED-owych. Kompaktowy kształt płyty i osadzenie elementów blisko środka osi obrotu wirującej części urządzenia przyczynia się do minimalnego wpływu na efekt niewyważenia.


Rys. 65. Schemat obwodu "CommunicationUnit". Źródło: opracowanie własne



Rys. 66. Widok płyty PCB obwodu "CommunicationUnit" oraz wycinek konstrukcji kulistego wyświetlacza prezentujący miejsce jej osadzenia. Źródło: opracowanie własne

7.3 Oprogramowanie mikrokontrolerów

Zaprojektowane i wykonane obwody drukowane są sprzętową częścią rozwiązania elektronicznego modelu kulistego wyświetlacza. Płyty PCB wyposażone w mikrokontrolery, w celu realizacji założonych zadań, wymagają opracowania algorytmów i zaimplementowania ich w postaci oprogramowania w pamieciach układów. Oprogramowanie wbudowane (ang. embedded) w rozbudowanej aplikacji musi wykonywać wiele czynności jednocześnie. W klasycznym sposobie tworzenia kodu zadania dzielone są na mniejsze fragmenty za pomocą maszyny stanów zrealizowanej za pomocą konstrukcji "*switch...case*" z wykorzystaniem mechanizmu zdarzeń. O ile w przypadku niewielkich programów takie podejście jest wystarczające, to w przypadku bardziej skomplikowanych aplikacji, z uwagi na konieczność tworzenia rozbudowanej maszyny stanów kodowanej w sposób ręczny, rozwiązanie to jest bardziej podatne na błędy. Z punktu widzenia przełączania zadań, zakodowana ręcznie maszyna stanów jest niejawnym przełącznikiem zadań (ang. scheduler), w którym można doszukać się zaimplementowanych mechanizmów komunikacji międzywatkowej. Rozwiązaniem częściej stosowanym w praktyce jest system operacyjny, odpowiedzialny za szeregowanie zadań oraz komunikacje między watkami lub procesami. Dzięki takiemu podejściu aplikację można podzielić na podzadania bez konieczności używania skomplikowanej maszyny stanów. Aplikacja staje się bardziej przejrzysta, ponieważ wszystkie zadania możemy zapisać jako liniowy ciąg czynności, a więc kod staje się dużo bardziej czytelny, a całość staje się mniej podatna na błędy.

Organizacja oprogramowania bazującego na systemie operacyjnym została wykorzystana w module odpowiedzialnym za sterowanie napędem oraz interfejsem użytkownika. Wybrano i zaimplementowano system FreeRTOS, który jest przeznaczony do

jednordzeniowych mikrokontrolerów w tym również układów z rodziny STM32F4. Kod źródłowy systemu napisany jest w języku C i kompiluje się razem programem użytkownika. W mikrokontrolerach odpowiedzialnych za sterowanie linijkami LED-owymi wybrano natomiast klasyczny sposób tworzenia oprogramowania. Aplikacja zainstalowana na mikrokontrolerach jest skoncentrowana w dużym stopniu na realizacji zadań w funkcjach obsługi przerwań. Wykonywane czynności nie są skomplikowane jednak muszą być wywoływane bez opóźnień czasowych. Architektura programu została zoptymalizowana pod kątem szybkości działania, co jest kluczowym kryterium umożliwiającym realizację zasadniczej funkcji urządzenia. Oprogramowanie mikrokontrolerów modelu kulistego wyświetlacza zostało napisane w języku C z wykorzystaniem zintegrowanego środowiska programistycznego STM32CubeIDE.

STM32CubeIDE jest zaawansowang platformą projektową opartą o framework Eclipse/CDT przeznaczoną do tworzenia projektów w języku C/C++. Zawiera zestaw narzędzi przeznaczonych do edycji, kompilowania i debugowania kodu. Kompilator C/C++ wykorzystuje GCC (ang. GNU Compiller Collection), a debuger GDB (ang. GNU Project Debugger). Środowisko STM32CubeIDE jest ściśle zintegrowane z kreatorem projektu CubeMX, który na podstawie informacji o typie mikrokontrolera pozwala stworzyć szkielet programu. Przygotowaną za pomocą graficznego narzędzia konfigurację można wygenerować w postaci kodu inicjalizacyjnego w języku C. Zintegrowane środowisko wspiera wykorzystane w projekcie biblioteki HAL (ang. Hardware Abstraction Layer), które stanowią wysokopoziomowy interfejs do części sprzętowej mikrokontrolera. Udostępniony jest ponadto menadżer pakietów zawierający zbiór stosów oprogramowania warstw (ang. Middle ware stacks), obsługujących interfejsy zaawansowanej pośredniczących łączności oraz systemy plików.

7.3.1 Oprogramowanie mikrokontrolerów linijek LED-owych

Opracowane oprogramowanie mikrokontrolerów sterujących linijkami LED-owymi opiera się na jednakowej architekturze aplikacji z rozróżnieniem parametrów charakterystycznych dla poszczególnych warstw obrazu. Konfiguracja wybierana jest poprzez makrodefinicję na etapie kompilacji kodu przed jego wgraniem do pamięci mikrokontrolera. Odmienne są również pliki danych obrazu zapisane na kartach pamięci. Zaimplementowany program realizuje kilka zadań jednocześnie, przy czym kluczowym jest sterowanie diodami RGB LED, poprzez wysyłanie strumienia danych do obsługujących je sterowników. Złożoność zadania wynika z konieczności przetwarzania ogromu informacji w krótkich interwałach czasowych synchronizowanych z pozycją wirujących linijek LED-owych w przestrzeni. Inne funkcje programu wykonywane sa w czasie bezczynności procesora między zdarzeniami realizującymi główny wątek. Działanie algorytmu jest możliwe dzięki wykorzystaniu potencjału rozbudowanych układów peryferyjnych mikrokontrolera, poprzez zmniejszenie nakładu pracy rdzenia układu. Ograniczenie obsługi programowej związane jest z przekierowywaniem transferów między peryferiami na szyny danych przy wykorzystaniu mechanizmu DMA.



Rys. 67. Algorytm działania zadania głównego programu sterującego linijką LED-ową. Źródło: opracowanie własne

Działanie programu rozpoczyna się od funkcji inicjalizujących moduły sprzętowe, w tym układ zegarowy oraz jednostki peryferyjne. Konfiguracja częstotliwości taktowania wykorzystuje pętlę sprzężenia fazowego PLL (ang. Phase Locked Loop) do zwielokrotnienia częstotliwości sygnału zegara zewnętrznego. Osiągnięta maksymalna wartość 168 MHz taktuje rdzeń i jest równolegle dzielona przy użyciu preskalerów do obsługi modułów

peryferyjnych. Następnie uruchamiane sa interfejsy komunikacyjne, do których należą SDIO (obsługujący kartę pamięci), SPI1, SPI3 (obsługujące sterowniki diod LED), a także UART (zapewniający transmisję z obwodami zewnętrznymi) oraz liczniki i porty wejść/wyjść. Podczas inicjalizacji sprzętu konfigurowany jest również moduł obsługujący przerwania. Nadanie odpowiednich priorytetów umożliwia właściwe wywłaszczanie zadań i skutkuje poprawnym działaniem programu. Kolejnym krokiem w algorytmie działania jest wykonanie instrukcji inicjalizujących wyższe warstwy oprogramowania, pośredniczące między aplikacją a warstwą fizyczną. Jednym z zaimplementowanych w projekcie modułów programowych jest FatFs obsługujący system plików FAT (ang. File Allocation Table) znajdujący się na karcie SD. Daje on możliwość zarządzania nośnikiem pamięci oraz wykonywania operacji na plikach i katalogach. Zgodność systemu plików między aplikacją a systemem operacyjnym, w którym przygotowywane są treści do wyświetlania, zapewnia wygodną metodę przenoszenia danych. Innym modułem stanowiącym pomost między aplikacją uruchomioną na mikrokontrolerze a warstwa fizyczną jest biblioteka zarządzająca sterownikami TLC5922. We wstępnej fazie działania programu konfiguruje ona sterowniki m.in. do pracy trybie 7-bitowej korekcji pradu wyjściowego dla każdego kanału.

Po zakończeniu inicjalizacji rozpoczyna się zasadniczy etap działania programu, którego punktem startowym jest odebrany sygnał z czujnika pozycji zerowej. Następuje on po uruchomieniu wirowania linijek LED-owych w momencie osiągnięcia ustalonej pozycji kątowej. W tym czasie otwierany jest również na nośniku pamięci pierwszy plik zapisanego obrazu, którego widok wyświetlany jest w czasie trwania jednego obrotu, reprezentując jedną klatkę ciągu animacyjnego. Następnie pobierany jest pakiet danych zawierający treść jednej kolumny obrazu, podzielonej na część górną i dolną obsługiwaną przez niezależne interfejsy SPI. Po otrzymaniu sygnału wyzwalającego z czujnika położenia generującego 250 impulsów na obrót następuje przekazanie wskaźników do dwóch funkcji obsługujących wysyłanie i uruchomienie kanałów DMA. Po odebraniu flagi zakończenia transferu następują zatrzaśniecie rejestrów wyjściowych sterowników i wyzwolenie przepływu pradu powodującego aktualizację stanu diod LED. Następnie inkrementowany jest indeks kolumny obrazu i odczytywana z pliku kolejna paczka danych. Cykl powtarzany jest do momentu wyświetlania całego obrazu składającego się z 250 kolumn. Kiedy to nastąpi, plik odczytany jest zamykany, a kolejny o wyższym indeksie jest otwierany. Wyświetlenie nowej klatki obrazu następuje w sposób analogiczny do opisanego schematu. Algorytm działania głównego zadania został przedstawiony na rys. 67. Należy dodać, że uzyskanie obrazu statycznego wymaga odświeżania treści tylko jednego pliku. Odtwarzanie zaś animacji, której kolejne widoki mają być aktualizowane w innym tempie niż wynika to z prędkości skanowania obrazu, wymaga zastosowania mechanizmu zarządzającego planem wyświetlania.

Mikrokontroler, po procesie inicjalizacji układów peryferyjnych w trakcie realizacji głównego algorytmu, wykonuje zadania dodatkowe, do których należą m.in. obsługa funkcji komunikacyjnych i wykonywanie ewentualnych operacji na danych obrazów. Dzieje się to w tzw. czasie bezczynności, który występuje w momentach oczekiwania na zdarzenia związane z obsługą głównego zadania. Wygospodarowanie przestrzeni czasowej na realizację założonych funkcji jest efektem, jak już wcześniej wspomniano, wykorzystania

mechanizmów DMA zwalniających obciążenie rdzenia procesora oraz optymalizacji funkcji sprowadzających się niekiedy do operacji bezpośrednio na rejestrach procesora.

7.3.2 Oprogramowanie mikrokontrolera sterującego napędem oraz graficznym interfejsem użytkownika

Oprogramowanie mikrokontrolera sterującego napędem wirującej części wyświetlacza i interfejsem użytkownika zostało opracowane w oparciu o system czasu rzeczywistego FreeRTOS w wersji 8.1. System zawiera otwarte źródło programu napisane w języku C, a jego jądro składa się z trzech plików kodu. Dystrybuowany jest na otwartej licencji i wspierany przez firmę Amazon. FreeRTOS, podobnie jak większość systemów operacyjnych, jest systemem wielozadaniowym, tzn. umożliwia uruchomienie i wykonywanie wielu zadań w tym samym czasie. W przypadku dysponowania tylko jednym rdzeniem procesora, jak ma to miejsce w wybranym mikrokontrolerze, wspomniana jednoczesność jest wyłącznie pozorna. W rzeczywistości procesor w jednej chwili wykonuje tylko jedno zadanie, ale działa z bardzo dużą szybkością i przełącza się pomiędzy kolejnymi zadaniami na tyle sprawnie, że odnoszone jest wrażenie jakby wszystko wykonywało się równocześnie. Za przydzielanie czasu procesora poszczególnym zadaniom oraz ich przełaczanie odpowiedzialna jest część systemu nazywana planistą (ang. scheduler). Obsługuje ona algorytm szeregowania, wyznaczający, które zadanie będzie wykonywane jako kolejne. System czasu rzeczywistego, oprócz poprawnej pracy pod względem logicznym, musi spełniać ograniczenia czasowe. Zaimplementowany system spełnia w tym zakresie kryterium "hard RTOS" oznaczające, że realizowane zadania nie tylko powinny być wykonane najszybciej jak to możliwe, ale przede wszystkim odpowiedzi systemu na zdarzenia muszą zostać zrealizowane w ściśle wyznaczonym czasie.

Algorytm działania programu zaimplementowanego na mikrokontrolerze został przedstawiony na rys. 68. W pierwszym etapie po uruchomieniu inicializowane są moduły warstwy fizycznej, w tym jednostki peryferyjne i układ zegarowy. W kolejnym kroku odbywa się przygotowanie do pracy systemu operacyjnego poprzez tworzenie zadań i mechanizmów komunikacji oraz synchronizacji procesów, do których należą semafory i kolejki. Uruchomienie systemu następuje poprzez aktywację planisty. W tym momencie inicjowane są skonfigurowane wcześniej procesy i rozpoczynają one realizacje wyznaczonych funkcji w pętlach nieskończonych. Pierwsze z zadań działających pod kontrolą systemu odpowiada za obsługę napędu układu wirujących linijek LED-owych. Zaimplementowany w procesie algorytm sterowania wykorzystuje dyskretną postać regulatora PID zaprojektowanego na etapie tworzenia modelu matematycznego. Niezbędne w obliczeniach dane wejściowe aktualizowane są w następujący sposób. Aktualna prędkość obrotowa kalkulowana jest na podstawie zmiany położenia układu wirujących linijek w zmierzonym przedziale czasu. Prędkość zadana pobierana jest natomiast z aktualnych nastaw wprowadzonych przez operatora urządzenia. Obliczony w wyniku różnicy prędkości uchyb umożliwia układowi regulacji wypracowanie wartości wyjściowej. Na jej podstawie następuje korekcja sterowania. Cykl powtarzany jest nieustannie z interwałem czasowym 1 ms. Kolejne zadanie polega na obsłudze graficznego interfejsu użytkownika. Po inicjalizacji bibliotek zarządzających pracą wyświetlacza LCD oraz enkodera następuje nieskończona pętla działań. Funkcje wykonywane co 50 ms w pierwszej kolejności oczekują na wprowadzenie informacji przez operatora, a następnie reagują odświeżeniem stanu wyświetlacza. Zaprojektowany interfejs graficzny zapewnia intuicyjne poruszanie się po menu przenosząc do wybranych ustawień, umożliwiając zarządzanie urządzeniem. Ostatnie z zadań systemu skupia się na obsłudze protokołu komunikacyjnego łączności bezprzewodowej Bluetooth i odczycie danych z nośnika pamięci. Funkcje procesu są ściśle zsynchronizowane z przerwaniami odpowiedzialnymi za wymianę danych z urządzeniami zewnętrznymi. Warto podkreślić, że zaimplementowany system przy prawidłowej konfiguracji, która polega na właściwym przydzieleniu zasobów i ustaleniu priorytetów zadań, zdarzeń i przerwań, zapewnia stabilną pracę programu, co tym samym umożliwia realizację założonych funkcji.



Rys. 68. Algorytm działania programu modułu sterującego napędem i interfejsem użytkownika wykorzystujący system czasu rzeczywistego FreeRTOS. Źródło: opracowanie własne

8 Opracowanie i uruchomienie oprogramowania narzędziowego i zarządzającego urządzeniem

Wizualizowanie trójwymiarowych treści za pomocą LED-owego wyświetlacza kulistego wymaga przygotowania odpowiednich struktur danych, zrozumiałych dla układów mikroprocesorowych modułów linijek LED-owych. Algorytm przetwarzający obrazy na standard zgodny z opracowaną koncepcją wyświetlania został zaimplementowany w oprogramowaniu narzędziowym i sterującym modelem. Opracowanie programu jest jednym z podstawowych celów pracy i stanowi uzupełnienie projektu o narzędzie do zarządzania wyświetlanymi treściami, tworząc kompletny system wyświetlania. Oprogramowanie zgodne z platformą Windows zostało napisane w zintegrowanym środowisku programistycznym Visual Studio z wykorzystaniem biblioteki OpenCV.



Rys. 69. Widok okna programu narzędziowego i zarządzającego modelem LED-owego wyświetlacza kulistego. Źródło: opracowanie własne

8.1 Środowisko programistyczne Visual Studio

Visual Studio jest zintegrowanym środowiskiem programistycznym opracowanym i wspieranym przez firmę Microsoft. W skład jego narzędzi programistycznych może wchodzić system operacyjny, zaawansowany edytor kodu, system kontroli wersji, narzędzia do testowania, a dla niektórych języków także niezbędne środowiska uruchomieniowe (np. wymagane do rodziny języków .Net). Visual Studio zawiera edytor kodu wspierający IntelliSense, jak również mechanizmy refaktoryzacji kodu. Zintegrowany debugger działa zarówno na poziomie kodu źródłowego, jak i maszynowego. Pozostałe elementy w ramach

Visual Studio to designer do tworzenia aplikacji Windows Forms, WPF i web, narzędzie do tworzenia klas, projektowania baz danych itd. Funkcjonalność Visual Studio praktycznie na każdym poziomie tej aplikacji można rozszerzać za pomocą dodatków. Producent Visual Studio oferuje trzy wersje programu: Community, Professionali Enterprise. W projekcie została użyta darmowa wersja Community, która mimo pewnych ograniczeń, umożliwiła opracowanie oprogramowania zgodnie z założeniami.

8.2 Biblioteka OpenCV

OpenCV (ang. Open Source Computer Vision Library) jest bezpłatną, opensource'ową biblioteką do użytku komercyjnego i edukacyjnego, niewymagającą udostępniania autorskich projektów opartych o jej implementację. Została napisana w języku C i C++ i rozwijana jest za pomocą wrapperóww wielu językach programowania, takich jak C#, Python, Ruby, Matlab czy Java. Wykorzystywana jest przez wielu użytkowników na całym świecie, zarówno amatorów układów robotyki, jak również specjalistów z zakresu sieci neuronowych [66, 67].

Biblioteka ta została stworzona na potrzeby aplikacji czasu rzeczywistego, gdzie wydajność obliczeniowa programów jest bardzo istotna. Napisana jest w zoptymalizowanym języku C/C++ i wykorzystuje możliwości, jakie dają popularne od kilku lat procesory wielordzeniowe.

Jednym z głównych celów biblioteki OpenCV jest dostarczenie narzędzia, które pozwala tworzyć szeroką gamę programów zarówno tych nieskomplikowanych jak i bardzo zaawansowanym. OpenCV jest narzędziem na tyle wszechstronnym, że amatorom korzystającym z kamery internetowej umożliwia poznawanie elementów przetwarzania obrazów w zakresie: wykrywania krawędzi, segmentacji czy filtracji obrazów, zaś specjalistom znacząco skraca czas pisania bazowych funkcji w zaawansowanych projektach. Możliwe jest to dzięki wbudowanym w bibliotece ponad 500 funkcjom, które obejmują wiele obszarów komputerowej wizji, takich jak robotyka, stereowizja, bezpieczeństwo, analiza obrazów medycznych czy kalibracja kamery.

W krótkiej charakterystyce biblioteki warto odwołać się do przyczyn powstania oraz historii OpenCV, której początki sięgają końca lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. W tamtym czasie korporacja Intel zainicjowała kilka projektów opartych o pracę w czasie rzeczywistym, takich jak śledzenie promieni, a także wyświetlanie obiektów 3D. Jeden z autorów tych projektów wizytując w tym czasie amerykańskie uniwersytety zauważył, że kilka zespołów uniwersyteckich, takich jak "MIT Media Lab" z MIT w Massachusetts dysponuje wieloma rozbudowanymi narzędzi do przetwarzania obrazów, które były upowszechniane i jednocześnie udoskonalane przez studentów. Dzięki współpracy tych zespołów oraz pomocy Intel's Performance Library Team zostało stworzone jądro z zaimplementowanym kodem oraz specyfikacją algorytmów. Dane te zostały przesłane do Intel's Russian Library Team w Niższym Nowogrodzie w Rosji, gdzie powstała biblioteka OpenCV.

8.3 Aplikacja narzędziowa i zarządzająca LED-owym wyświetlaczem kulistym

Opracowane oprogramowanie wykorzystuje w procesach przetwarzania warstwowe dane trójwymiarowe. Ich źródłem, jak już opisano w początkowej części pracy (rozdział 4), są przede wszystkim mapy warstwowe, przekroje geograficzne, dane meteorologiczne, oraz informacje strategiczne położeń samolotów i satelitów w przestrzeni nad ziemią. Wyświetlenie obiektów 3D i modeli bryłowych wiąże się z wykonaniem przetwarzania wstępnego za pomocą przygotowanego w środowisku Matlab modułu to "plasterkowania" brył 3D.

Obraz każdej zaimportowanej do aplikacji warstwy może być poddany niezależnym obróbkom formatującym, do których należą funkcje m.in. skalowania, kadrowania i rotacji. Następnie dane rozpisywane są na macierze zgodnie ze standardem biblioteki OpenCV, gdzie każdy piksel widoczny w obrazie opisany jest trzema składowymi kolorów RGB. Każda składowa przyjmuje wartości z przedziału <0,255> i jest reprezentowana przez daną 8-bitowa. Ze względu na charakterystykę dobranych sterowników diod LED operujących na 7-bitowej korekcji prądu diody, w pierwszym kroku przetwarzania następuje ograniczenie bitowej głębi kolorów do 7 bitów dla każdej składowej. Następnie macierze danych poddane są funkcji modyfikującej wartości tonalne kolorów. Ma to na celu dostosowanie natężenia światła emitowanego przed diody LED do charakterystyki postrzegania światła przez ludzkie oko. W wyniku korekcji możliwa jest liniowa obserwacja zmian natężenia światła przez narzad wzroku, zgodna z odbiorem informacji z tradycyjnych ekranów 2D. Macierze danych w kolejnym kroku przetwarzania zmieniają format, tworząc struktury zgodne z przyjętym standardem i zrozumiałe do odczytu przez mikrokontrolery wyświetlacza. Sposób zapisu treści podyktowany jest przyjętą architekturą elektroniczną, dobranymi elementami sterującymi i zaprojektowanym układem połączeń komponentów na obwodach drukowanych. Przygotowane dane wyjściowe w końcowym etapie zapisywane są do pliku w pamięci komputera, skąd mogą być przeniesione do kulistego wyświetlacza za pomocą karty pamięci lub zostać wysłane bezpośrednio transmisją bezprzewodową.

Zarządzanie zasobami LED-owego wyświetlacza kulistego umożliwia bezprzewodowa transmisja Bluetooth, która z poziomu aplikacji widziana jest jako szeregowy port komunikacyjny. Instalacja i parowanie modułów BT modelu wyświetlacza muszą zostać wykonane na wstępie. W oprogramowaniu do kontroli portu szeregowego została użyta klasa SerialPort. Zapewnia ona synchroniczna obsługę zdarzeń wejść i wyjść z zarządzeniem przerwań i kontrolą właściwości połączenia. Dostarcza również mechanizmy do obsługi i kontroli przepływu strumienia danych.

9 Podsumowanie

Celem głównym rozprawy było opracowanie konstrukcji i oprogramowanie LEDwyświetlacza kulistego oraz eksperymentalne zweryfikowanie możliwości owego zobrazowania rzeczywistości wirtualnej poprzez wizualizację informacji przestrzennej z zastosowaniem mechatronicznego układu wyświetlania kulistego. Realizacja celu głównego uwarunkowana była przeprowadzeniem szeregu procesów, do których należało zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie modelu funkcjonalnego, opracowanie obwodów elektronicznych i oprogramowanie mikrokontrolerów, a także opracowanie oprogramowania narzędziowego i zarządzającego urządzeniem. Prace konstrukcyjne są następstwem przeprowadzonych w fazie początkowej realizacji projektu badań teoretycznych, w których opracowano model matematyczny odnoszący się do nowoopracowanej koncepcji wyświetlania trójwymiarowego, oraz przeprowadzono wirtualną symulację efektów wizualnych na obrazach jedno i wielowarstwowych. Dodatkowym zrealizowanym celem naukowym rozprawy jest zrozumienia procesu projekcji wirtualnych obrazów z użyciem nowoczesnych źródeł światła jakimi są diody LED, wykorzystując strumień złożonych, wielowymiarowych danych cyfrowych.

Efektem finalnym rozprawy doktorskiej jest działające złożone urządzenie mechatroniczne, które można zaliczyć do klasy wyświetlaczy wolumetrycznych 3D, gdzie obraz tworzy się na powierzchni pełnej sfery. W zaprojektowanym i zrealizowanym wyświetlaczu LED-owym zintegrowano moduł mechaniczny z napędem elektrycznym oraz moduł elektroniczny ze specjalistycznym autorskim oprogramowaniem do sterowania ponad czterystoma diodami LED. **Oryginalność wyświetlacza w skali światowej** polega na jednoczesnym wyświetlaniu różnych obrazów na wszystkich sferach, skutkiem czego jest optyczne złudzenie istnienia trzeciego wymiaru nakładających się obrazów, prostopadłego do powierzchni sferycznych. Pozytywne zrealizowanie i uruchomienie LED-owego wyświetlacza wolumetrycznego oraz jego testy eksploatacyjne potwierdziły możliwość aplikacji oryginalnego narzędzia do różnorodnych wizualizacji 3D.

Podjęcie zadania opracowania niestosowanej dotąd techniki polegającej na budowie wielowarstwowego LED-owego wyświetlacza kulistego, było zadaniem pionierskim i jest oryginalne w skali światowej. Istniejące dotychczas wyświetlacze, działające na zasadzie skanowania mechanicznego, są wstanie generować jedną warstwę obrazu, opisaną najczęściej na płaskiej lub zakrzywionej powierzchni. W zrealizowanej koncepcji wyświetlania, opartej na tworzeniu stosu obrazów, możliwe jest kreowanie wirtualnej wizji obiektów w rzeczywistej przestrzeni. Obecność następujących po sobie warstw obrazów umożliwia przekazanie informacji o trzecim wymiarze. Podkreślając technologiczny stopień komplikacji wyświetlacza i synchronizacji jego modułów, należy stwierdzić, że narasta on wykładniczo z każdą kolejną dodaną linijką LED-ową tworzącą sferyczną powierzchnię wyświetlania obrazu. Wyróżniającą cechą konstrukcji jest ponadto kulisty kształt obszaru projekcyjnego, który wypełniają sferyczne warstwy punktów świetlnych. Możliwe jest dzięki temu obserwowanie przestrzennych obrazów ze wszystkich stron i z pod dowolnych kątów. Nowością jest również przyjęta w założeniach modułowość konstrukcji, która cechuje elementy mechaniczne oraz rozwiązanie elektroniczno–programowe. Dzięki temu istnieje możliwość rozbudowy urządzenia o kolejne moduły generujące warstwy obrazu, których liczba limitowana jest jedynie stopniem miniaturyzacji wykorzystanych w konstrukcji elementów fizycznych.

Skonstruowane urządzenie ze względu na kulisty kształt przestrzeni projekcyjnej zostało opracowane z podstawowym założeniem wyświetlania warstwowych danych geograficznych na tle obrazu kuli ziemskiej z kontynentami i oceanami. Dzięki temu możliwe jest wizualizowanie różnego typu trójwymiarowych map z uwzględnieniem m.in. hipsometrii terenu. Wielowarstwowa struktura obrazu w wyjątkowo czytelny sposób przekazuje informacje meteorologiczne, topologiczne ekonomiczne, demograficzne itp. na planie ziemskiego globu widzianego z każdej strony. Zaprojektowana przestrzeń projekcyjna może być wykorzystana również do wizualizowania sytuacji powietrznej w zastosowaniach wojskowych i cywilnych. Monitorowany ruch samolotów, satelitów i innych obiektów przedstawiać ma nie tylko położenie, ale również relacje wysokościowe. Kombinacja wyświetlanych efektów jest w stanie przekazać kompletną informację przestrzenną, która na tradycyjnych urządzeniach wyświetlających jest mniej czytelna i intuicyjna. LED-owy wyświetlacz kulisty umożliwia prezentację również innych treści, m.in. nieskomplikowanych obiektów 3D, brył geometrycznych i napisów.

W ramach realizacji pracy doktorskiej wykonałem szereg wyznaczonych zadań oraz rozwiązałem zaistniałe problemy techniczne. Kluczowym osiągnięciem było opracowanie oryginalnej metody tworzenia obrazów 3D wykorzystującej dynamiczny układ skanowania mechanicznego z zastosowaniem kilku linijek LED-owych tworzących niezależne widoki. Opracowałem model matematyczny wizualizacji obrazów 3D na powierzchniach sferycznych, którego poprawność została zweryfikowana zarówno w symulacji komputerowej jak również w fizycznym modelu skonstruowanego wyświetlacza. Wyznaczyłem również model matematyczny ruchomej części urządzenia, co umożliwiło zaprojektowania regulatora PID oraz dobranie optymalnych nastaw. Skuteczność zaimplementowanego regulatora w jednostce sterowania napędem potwierdzona została badaniami eksperymentalnymi. Stabilność pracy wirującego układu wpływa na osiągnięcie wysokiej jakości obrazu generowanego przez wyświetlacz kulisty. Skomplikowanym zagadnieniem konstrukcyjnym okazało się zaprojektowanie i wykonanie wirującego układu kilku linijek LED-owych. Trudność zadania wynikała z konieczności zapewnienia wytrzymałej formy odpornej na działanie przeciążeń wynikających z działania ruchu obrotowego przy jednoczesnej miniaturyzacji przekrojów profili i zapewnieniu im aerodynamicznych kształtów. Kolejnym koniecznym do rozwiazania problemem technicznym było wyważanie nieosiowosymetrycznego, wirującego układu. Opracowałem w tym celu dedykowaną metodę korekcji niewyważenia pozwalającą na wykonywanie skutecznego procesu wyważania wirnika w łożyskach własnych urządzenia. Zadaniem najbardziej zaawansowanym technologicznie było opracowanie rozwiązań elektronicznych i programowych. Realizacja urządzenia wymagała doboru i zastosowania najnowocześniejszych podzespołów elektronicznych, w tym diod LED RGB, których badanie parametrów stanowiło znaczący wkład w pracę. Ponadto przetwarzanie przez układy mikroprocesorowe ogromu danych w ściśle określonym czasie stanowiło istotny do rozwiązania problem techniczny. Opracowałem w tym celu i zaimplementowałem wielozadaniowy algorytm, który wykorzystując maksymalnie dostępne zasoby sprzętowe dobranych jednostek mikroprocesorowych zapewnia prawidłowe działanie urządzenia.

Następnie uruchomiłem prototyp wyświetlacza 3D integrując moduły mechaniczne i elektroniczne z oprogramowaniem informatycznym. Poprawnie działający model wyświetlacza podałem badaniom użytkowym. Uzyskane wyniki w postaci osiągnięcia wysokiej jakości efektów wizualnych prezentowanych obrazów 3D potwierdziły skuteczność opracowanej metody wyświetlania.

Zrealizowałem pozytywnie teoretyczne i eksperymentalnie wyznaczone cele co pozwoliło stwierdzić udowodnienie tezy postawionej we wstępie rozprawy:

Możliwe jest opracowanie urządzenia prezentującego obraz wirtualnej rzeczywistości stworzony na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego.

Wykonany model funkcjonalny LED-owego wyświetlacza kulistego, uzupełniony o oprogramowanie narzędziowe i sterujące urządzeniem, tworzy kompletny system wyświetlania trójwymiarowego. Zaimplementowany w oprogramowaniu algorytm przetwarzający obrazy, generuje dane o standardzie zgodnym z nowoopracowaną koncepcją wyświetlania. Strumień danych w obszarze projekcyjnym urządzenia, wykorzystując możliwości technologii informatycznej, tworzy twójwymiarowy obraz, który postrzegany jest przez odbiorę jako wirtualna wizja przedmiotów, obiektów i animacji na tle otoczenia. Stworzony na tej podstawie obraz wirtualnej rzeczywistości, zaklasyfikowany do systemów częściowo zanurzających, jest cyfrową imitacją elementów świata rzeczywistego.

Skonstruowany model funkcjonalny i opracowana metoda wyświetlania stanowią bazę do dalszego rozwoju technologii. Najbardziej pożądanym czynnikiem zwiększającym możliwości urządzenia byłoby rozbudowanie konstrukcji o kolejne linijki LED-owe. Dzięki dodatkowym warstwom obrazu rozdzielczość głębi obrazu zwiększyłaby się, zaś strefa martwa przestrzeni projekcyjnej zostałaby zniwelowana lub całkowicie zniknęła. urządzenia pod kątem znaczącej poprawy efektywności Modernizacia wymaga zaangażowania szerszego grona eksperckiego z różnych dziedzin, w tym, m.in. z inżynierii materiałowej i mechaniki. Obiecującym zjawiskiem jest stale postępująca miniaturyzacja elementów elektronicznych zapewniająca możliwość projektowania bardziej zaawansowanych układów o mniejszych wymiarach. Przedstawione warunki mogłyby wpłynąć na możliwość rozwoju konstrukcji i osiągnięcie efektów wizualnych o szerokim zakresie zastosowań na rynku komercyjnym, w tym w zastosowaniach obronnych.

Literatura

- 1. E. N. Marieb, K. N. Hoehn: Human Anatomy & Physiology, Pearson, 2012.
- 2. T. Okoshi: Three-Dimensional Imaging Techniques, Academic Press, 1976.
- 3. J. Geng: *Three-dimensional display technologies*, Advances in Optics and Photonics (strony456-535), 2013.
- 4. J.Geng: *Multiview three-dimensional display using single projector*, Displays nr 34 (strony 39-48), 2013.
- 5. B. G. Blundell, A. J. Schwarz: *The Classification of Volumetric Display Systems: Characteristics and Predictability of the Image Space*, Transactions on visualization and computer graphics(strony 66-75), 2002.
- 6. M. Głowacki, A. Czubernat: *Wizualizacja trójwymiarowych pól skalarnych z wykorzystaniem technik renderingu objętościowego*, Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 4/2002.
- 7. D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, M. S. Banks: Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, J. Vis. 8(3): 33, 1-30, 2008.
- 8. S. Pastoor, M. Wöpking: 3-D displays: A review of current technologies, Displays 17 (strony 100-110), 1997.
- 9. T. Peterka, R. L. Kooima, D. J. Sandin, A. Johnson, J. Leigh, T. A. DeFanti:*Advances in the Dynallax solid-state dynamic parallax barrier autostereoscopic visualization display system*, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 14, (strony 487–499), 2008.
- 10. C. van Berkel, D. W. Parker, A. R. Franklin: *Multiview 3D LCD*, Biblioteka cyfrowa SPIE, Post. 2653, San Jose, USA, 1996.
- 11. G. J. Woodgate, D. Ezra, J. Harrold, N. S. Holliman, G. R. Jones, R. R. Moseley: *Observer tracking autostereoscopic 3D display systems*, Biblioteka cyfrowa SPIE, Post. 3012, San Jose, USA, 1997.
- 12. P. T. Kovacs, K. Lanckner, A. Barsi, V. K. Adhikarla: *Analysis and optimization of pixel usage of light-field conversion from multi-camera setups to 3D light-field display, s*IEEE International Conference on Image Processing, France, 2015.
- 13. Holografika, www.holografika.com.
- 14. M. W. Jones, G. P. Nordin, J. H. Kulick, R. G. Lindquist, S. T. Kowel: A liquid crystal display based implementation of a real-time ICVision holographic stereogram display, Biblioteka cyfrowa. SPIE Post. 2406, 1995.
- 15. D. Fattal, Z. Peng, T. Tran, S. Vo, M. Fiorentino, J. Brug, R. G.Beausoleil: A *multidirectional backlight for a wide-angle glasses-free three-dimensional display*, Nature 495, (strony 348-351), 2013.
- 16. Z. Jankiewicz: *Holografia optyczna (i co dalej?)*, Seminarium, Instytut Optoelektroniki WAT, Warszawa, 2018.
- 17. D. E. Smalley, Q. Y. Smithwick, V. M. Bove, J. Barabas, S. Jolly: Anisotropic leakymode modulator for holographic video displays, Nature 498, (strony 313-317), 2013.
- 18. D. E. Smalley, Q. Y. J. Smithwick, and V. M. Bove: *Holographic video display based on guided-wave acousto-optic devices*, Biblioteka cyfrowa SPIE Post. 6028, USA, 2007.

- 19. Massachusetts Institute of Technology (MIT), https://www.mit.edu/.
- 20. M. Klug, T. Burnett, A. Fancello, A. Heath, K. Gardner, S. O'Connell, C. Newswanger: *A scalable, collaborative, interactive light-field display system,* SID Symposium Digest of Technical Papers (strony 412-415), 2013.
- 21. Zebra Imaging, www.zebraimaging.com.
- 22. K. Langhans, Ch. Guill, E. Rieper, K. Oltmann, D. Bahr: *Solid Felix: A Static Volume 3D-Laser Display*, The International Society for Optical Engineering, Niemcy, 2003.
- 23. D. Wyatt, L. Wujanto: A *Volumetric 3D LED Display*, MIT 6.111: Introductory Digital Systems Laboratory, Massachusetts, USA, 2005.
- 24. D. MacFarlane: *Volumetric three dimensional display*, Applied Optics 33, (strony 7453-7457) USA, 1994.
- 25. LightSpace Technologies, www.lightspacetech.com.
- 26. G. Reis, P. R. Havig, E. L. Helt: *Color and shape perception on the Perspecta 3D volumetric display* The International Society for Optical Engineering, Biblioteka cyfrowa SPIE, Post. 6558, 2007.
- 27. "Persistence of vision", http://en.wikipedia.org/wiki/Persistence_of_vision.
- 28. N. Leindecker, patent USA, *High reselution and dynamicrangepersistence of vision display*, WO2017180347, Październik 10, 2017.
- 29. Chen Xuejiao, LiuHai:Large-scale POV-LED display equipment and solution for dynamic balance in display proces, patent chiński, CN107146544, wrzesień 8, 2017.
- 30. YuAolin, He Zonghai, Zhang Xiaobo: *POV rotary LED display screen for offices and control system of LED display screen*, patent chiński, CN108269508, lipiec 10, 2018.
- 31. Weihiu Motor CO LTD: Lamp bead display device, patent chiński, CN110792930, Luty 14, 2020.
- 32. Dalian Taiyu Science & Technology CO LTD: *Rotary display screen*, patent chiński, CN103606340, Luty 26, 2014.
- 33. Yu Xinmin: *Full-color stereoscopic all-dimensional display device*, patent chiński, CN103632617, Marzec 12, 2014.
- 34. S. Frisco, S. Strumpf: *Light sphere display divice*, patent USA, US 20180200618, Lipiec 19, 2018.
- 35. J. Ratti, S. Chan: *Methods and devices for using aerial vehicles to create graphic displays and reconfigurable 3D structures*, patent USA, US10109224, Październik 23, 2018.
- 36. K. Seongukk, B. Hyewon, L. Sean: *Rotation information display device*, patent USA, US2005050778, Marzec 10, 2005.
- 37. S. Łuniewski: *Kulisty wyświetlacz z wirującą kolorową linijką LED-ową i sterowaniem bezprzewodowym*, Praca MagisterskaWojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, 2014.
- 38. S. Łuniewski: *Trójwymiarowy globus z wirującą linijką diodową*, praca inżynierska, Wojskowa Akademia techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, 2011.
- 39. B. Zygmunt, W. Śmietański, S. Łuniewski: *3-D Spherical POV Display with Rotating Semicircular Line of LEDs*, Intern. J. of Electronic Communication and Computer Engineering (strony 80-83), 2017.

- 40. S. Łuniewski: *Kulisty, kolorowy wyświetlacz widmowy,* Elektronika Praktyczna nr 8, (strony 32-43), 2014.
- 41. Spherical Display, https://newatlas.com/ntt-docomo-spherical-drone-display/49214/.
- 42. High quality POV display, https://www.youtube.com/watch?v=Lr_t0wTCCFo.
- 43. POV LED globe, https://www.youtube.com/watch?v=g7_VKGsEKeA.
- 44. ViZoo, http://www.vizoo.com.
- 45. Vermeer, http://research.microsoft.com/en-us/projects/vermeer/.
- 46. P. Simonson, M. Corell: *Method and arrangement for projecting images*, U.S. patent 7,184,209 Luty 27, 2007.
- 47. J. Berbeka: Wirtualna i rozszerzona rzeczywistość a zachowania konsumentów, Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, nr 303, 2016.
- 48. M. Panuś: *Stereowizja z wykorzystaniem wielu kamer*, Praca Magisterska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki Informatyki i Telekomunikacji, AGH Kraków, 2012.
- 49. M. Stefańczyk, T. Kornuta: Akwizycja obrazów GGB-D: metody, Pomiary Automatyka Robotyka. (strony 82-90), 2014.
- 50. L. Calderone, K, Matthews, *What is the Structured Light Imaging?*, Robotics Tomorrow, 04/2018.
- 51. R. Miron: *Czujniki pomiaru odległości typu ToF poradnik projektanta*, Portal ElektronikaB2B, 06/2020.
- 52. S. H. Choi, K. T. Kwok: *A memory Efficient Slicing Algorithm for Large STL Files*, Computer Science, *Hong Kong*, 1999.
- 53. R. Minetto, N. Valpoto, J. Stolfi, R. Gregori, M. da Silva: An optimal algorithm for 3D triangle mesh slicing, Computer-Aided Design (strony 1-10) Brazylia, 2017.
- 54. F. A. Adnan, F. R. M. Romlay, M. Shafiq: *Real-time slicing algorithm for Stereolithography (STL) CAD model applied in additive manufacturing industry*, International Conference on Innovative Technology, Engineering and Sciences 2018 (iCITES 2018), Malezja, 2018.
- 55. D. Wojtyra: *Projekt i synteza systemu kierowania ogniem przeciwlotniczego zestawu rakietowo-artyleryjskiego bardzo krótkiego zasięgu*. Rozprawa Doktorska. Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2020.
- 56. R. Łączkowski: Wyważanie elementów wirujących. Warszawa: WNT, 1979.
- 57. P. Rzeszuciński: Diagnostyka maszyn wirujących. Przegląd Mechaniczny, 11/2013.
- 58. A. Dobrowolski: *Dyskretne przekształcenie Fouriera*, Elektronika Praktyczna nr 2, (strony 97-100), 2006,
- 59. R. Venkatachalam: *Mechanical Vibrations*. New Delhi: Asoke K. Ghosh PHI Learning Private Itd, 2014.
- 60. Karta charakterystyki MMA7361L, Freescale Semiconductor. Rev 0, 04/2008.
- 61. Karta charakterystyki diody LED: 15014M173100, Wurth Elektronik.
- 62. Karta Charakterystyki układu: TL5922, Texas Instruments.

- 63. Karta charakterystyki mikrokontrolera: STM32f405 ST Microelectronics.
- 64. L. Grodzki: *Stałoprądowe sterowanie diodą RGB*, Prace Instytutu Elektrotechniki (strony 129-137), Warszawa, 2010.
- 65. K. Pawliczak: *Projektowanie płytek za pomocą Altium Designer Summer 09 (6)*, Elektronika Praktyczna nr 5, (strony 126-137), 2011.
- 66. A. Kaehler, G. R. Bradski: *OpenCV 3, Komputerowe rozpoznawanie obrazu w C++ przy użyciu biblioteki OpenCV*. Helion 2017.
- 67. Strona internetowa: opencv.org.