

ZESZYTY NAUKOWE  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

---

SCIENTIFIC LETTERS  
OF RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

NR 294  
(e-ISSN 2300-6358)

# ELEKTROTECHNIKA

Kwartalnik  
tom XXIV  
zeszyt 35 (nr 1/2016)  
styczeń-marzec



WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny  
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
prof. dr hab. inż. Leonard ZIEMIAŃSKI

Rada Naukowa  
prof. Lúbomir BEŇA (Słowacja), prof. Victor BOUSHER (Ukraina)  
prof. Stanisław GRZYBOWSKI (USA), prof. Michal KOLCUN (Słowacja)  
prof. Stefan KULIG (Niemcy), dr hab. Grzegorz MASŁOWSKI (Polska)  
prof. Stanisław PIRÓG (Polska), prof. Leszek TRYBUS (Polska)  
dr hab. Marian WYSOCKI (Polska)

Komitet Redakcyjny  
(afiliacja: Polska)

*redaktor naczelny*

prof. dr hab. inż. Lesław GOŁĘBIEWSKI

*redaktorzy tematyczni (naukowi)*

dr hab. inż. Adam BRAŃSKI, prof. PRz, dr hab. inż. Robert HANUS, prof. PRz,  
prof. dr hab. inż. Jacek KLUSKA, prof. dr hab. inż. Andrzej KOLEK,  
dr hab. inż. Mariusz KORKOSZ, prof. PRz, dr hab. inż. Stanisław PAWŁOWSKI, prof. PRz,  
dr hab. inż. Jerzy POTENCKI, prof. PRz, dr hab. inż. Zbigniew ŚWIDER, prof. PRz

*redaktor statystyczny*

dr inż. Wiesława MALSKA

*sekretarz redakcji*

dr inż. Robert ZIEMBA

*członkowie*

dr inż. Marek GOŁĘBIEWSKI, dr inż. Maciej KUSY  
dr inż. Mariusz MAĆZKA, dr inż. Dominik STRZAŁKA  
dr inż. Bartosz TRYBUS

Redaktor językowy  
Piotr CZERWIŃSKI

Przygotowanie matryc  
Robert ZIEMBA

p-ISSN 0209-2662

e-ISSN 2300-6358

Wersja drukowana Zeszytu jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki,  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów (e-mail: ziemba@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika>

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów (e-mail:oficyna1@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl>

Informacje dodatkowe – str. 69

## SPIS TREŚCI

Adama SAMAKE, Piotr KOCANDA, Andrzej KOS: Improvement of microsystem throughput using new cooling system .....	5
Mateusz MUCHA: System wysokiej rozdzielczości oparty o kontroler Raspberry PI .....	17
Kamil SIDOR: Zastosowanie metod eksploracji danych do wspomaganie przygotowania procesu dydaktycznego .....	27
Mirosław SOBASZEK, Michał MARKIEWICZ: System do pomiaru prędkości regatowej łodzi żaglowej.....	39
Dawid WARCHOŁ: Porównanie i łączenie cech deskryptorów chmur punktów w rozpoznawaniu statycznych układów dłoni .....	51

Adama SAMAKE<sup>1</sup>  
Piotr KOCANDA<sup>2</sup>  
Andrzej KOS<sup>3</sup>

## IMPROVEMENT OF MICROSYSTEM THROUGHPUT USING NEW COOLING SYSTEM

This paper presents a new possibility of clock frequency/voltage control in microsystems i.e. high performance processors, exploiting information about cooling efficiency. In this paper, we propose an approach that better exploits the thermal abilities of a chip fixed to cooling system in order to eliminate its energy accumulation. For the purpose of the proposed method, the calculation of so called time shift (TS) is introduced. TS is defined as the duration where the computational system can perform the task at higher frequency without any thermal violation when the chip temperature is close to critical thermal threshold. The analogy between thermal and electrical parameters allows to model RC thermal compact model of structure (chip fixed to the cooling system). Based on this assumption, the authors compute the TS value versus different parameters using RC thermal compact model in Spice environment. The results indicate that TS could fulfil a significant part of die total working time. As an effect the proposed approach may be a means for increasing average clock frequency or voltage supply, consequently enhancing the system's throughput.

**Keywords:** clock frequency, voltage supply, heat pipes, temperature sensors, throughput of microprocessor

### 1. Introduction

Since, the high power computation systems demand has been growing up enormously in the market, the amount of electronic components per unit area in the integrated circuit interior has been raising exponentially. As a result, the power density generated by the components has become significantly important

---

<sup>1</sup> Adama Samake, AGH University of Science and Technology, Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications, Al. Mickiewicza 30, Krakow, Poland, PhD Student from Mali

<sup>2</sup> Piotr Kocanda, AGH University of Science and Technology, Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications, Al. Mickiewicza 30, Krakow, Poland, PhD Student

<sup>3</sup> Corresponding author: Andrzej Kos, AGH University of Science and Technology, Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications, Al. Mickiewicza 30, Krakow, Poland, e-mail: kos@agh.edu.pl

thus allowing the chip to overheat. Consequently, it causes enormous issues such as the increasing of cooling cost, performance decreasing and poor reliability of the chip [9].

Recently statistics results have shown that the major causes of chip failures are due to the inappropriate thermal design of electronic systems [12]. Taking into account all these aspects provoked by chip overheating, monitoring and controlling of the electronic systems temperature is crucial in order to achieve the highest possible data processing efficiency and reliability [4].

Removing the heat using fan from a heat sink attached to a package (integrated circuit) and Dynamic Frequency Voltage Scaling (DFVS) are considered as a conventional thermal management [1, 3]. The temperature of an element (chip, heat sink, etc.) in the electronic system depends on its own temperature and the temperature of the neighboring elements. Taking into account this fact, the current data collected from heat sink edge (temperature sensor) about cooling efficiency may be exploited as a way to control the clock generator frequency of the integrated circuit by taking advantage of its characteristics. It targets on allowing more time for chip to operate in highest frequency and enhances its performance. Conventionally, as the temperature of chip reaches a predefined thermal threshold, the DFVS technique tends to decrease the operating frequency and voltage by degrees. As a matter of fact it increases the lifetime of given process. Hence, it is important to underline that the method proposed in this paper can be implemented without any modification of system micro-architecture, the only requirement is the attachment of one temperature sensor in appropriate place on the heat sink.

Monitoring and controlling chip temperature using phase change techniques presents a huge advantage in terms of power (heat) transfer [5]. During transition temperature it is capable to remove latent heat under isothermal condition. According to numerous investigations, many substances possess higher latent heat of vaporization than latent heat of fusion [8]. Due to that reason, attaching a chip to the heat sink via heat pipe allows absorption of heat generated in the chip and releases it to the surrounding cooling air at any single moment of time. A heat pipe is a simple pipe having internal wall fixed with capillary wicking material, normally a portion of it is filled with a fluid (which could be water) [5]. The temperature of the liquid located at the end of heat pipe attached to the heat source rises continuously up to the boiling point. Whenever the liquid temperature reaches this point, it continues to absorb power (heat) while maintaining the temperature constant thus, the liquid starts to evaporate. Owing to the pressure gradient generated by the temperature difference between different parts of pipe, the vapour spreads to other region, in order to be cooled and condensed. The condensed liquid is then passively pumps back to the region attached to heat source (chip) via wick structure. Hence, the cycle continues as long as the temperature difference exists.

This paper focuses in the introduction of a newly technique based on the possibility of clock frequency/ supply voltage control in microsystems, exploiting information about cooling efficiency. Several investigations have been done in this research area. In paper [2], the phenomenon of thermal inertia into integrated circuits has been described. In [10], a solution for online overheating protection of electronic systems has been proposed, using thermal sensor and thermal monitoring master (TMM) circuit. The use of an additional built-in circuitry to proposed technique allows offline static and transient thermal testing. In paper [13] the spray cooling of electronic chips has been investigated without using any heat sink. In [7] numerical modelling and experimental investigation have been performed to show the possibility of building a heat pipe embedded in metal core printed circuit board. The proposed technique significantly enhances heat spreading capability compared to conventional printed board. Reduction of 35-45% in thermal resistance of metal core printed circuit board has been found as the result of experimental investigation, which agrees with numeral modelling.

## 2. Thermal Model

Fig.1 depicts the complex thermal system having thermal pipes. The integrated circuit is situated in an adiabatic surrounding and connected to the parallel plate fin heat sink with U-shape channels via heat pipe. One temperature sensor is fixed to the fin of heat sink hence, the whole system is attached to an active fan. During die activation it generates and dissipates a certain amount of power (heat). Therefore, the heat transfer from chip interior to surrounding air starts when the heat reaches the end of the heat pipe attached to the die. The thermal control of the system is focused on convection coefficient rising (turning on the fan) at heat sink level when the chip's temperature moves toward thermal threshold. This act rapidly cooled the heat sink while maintaining the constant temperature close to critical thermal threshold on the chip surface for a significant period of time. For simplification of complex thermal system, a RC-compact model has been created. The different parts of system are modelled by a high order system.

## 3. Simulation of time shift versus different parameters

As shown in the formula below, parameters are function of the geometries and physical proprieties. The duality between thermal, electrical resistances and capacitances are described in [11]. Also exists an analogy between heat source and electrical current. Notice that, the heat power can be presented either as a heat source or as a heat exchanger having proper direction (negative or positive) in a circuit [6]. Let's calculate the particular parameters:

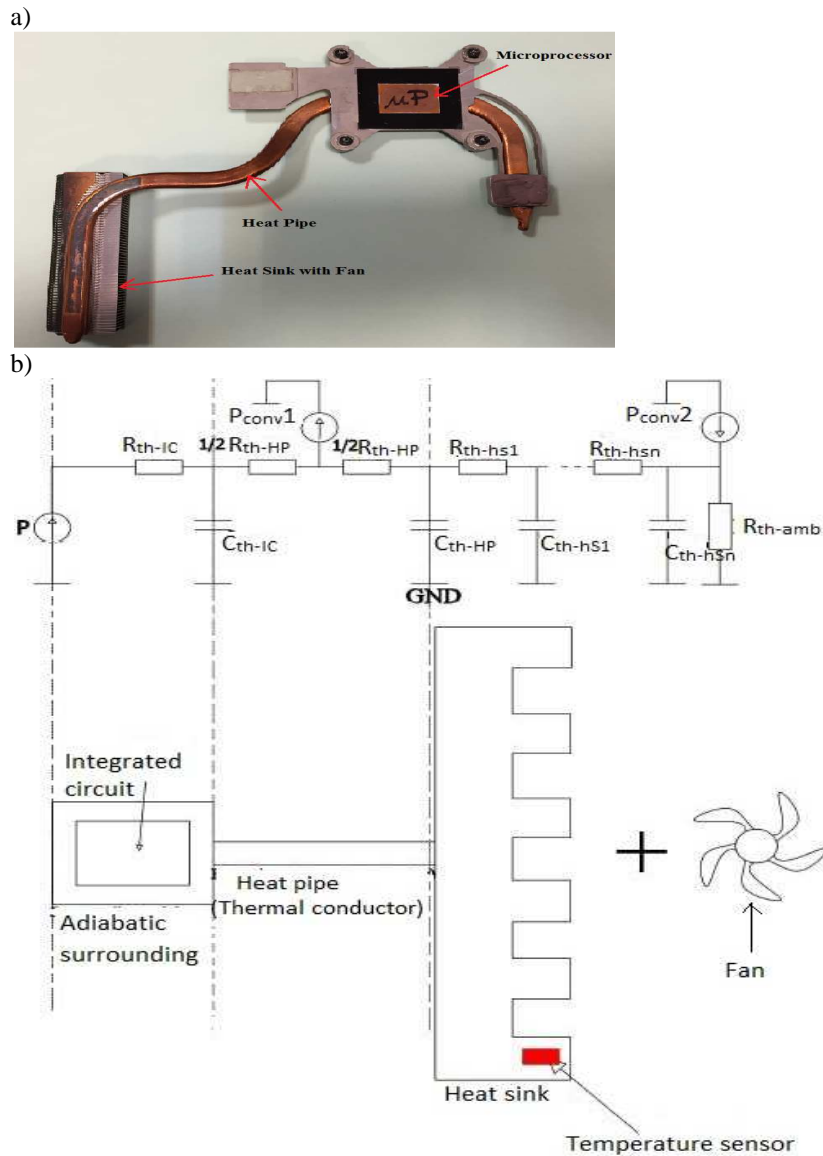


Fig.1 (a) A finned passive heat sink connected to a laptop microprocessor via a heat pipe and (b) Model of cooling system (Integrated circuits connected to parallel plate fin heat sink with U-shape channels via a heat pipe and its equivalent RC thermal network). Where:  $P$  is the power generated by the integrated circuit,  $P_{conv1}$  is the power (heat) absorbed by the fluid inside heat pipe (notice that the heat pipe release power to the heat sink),  $P_{conv2}$  is the power (heat) release to the ambient,  $R_{th-IC}$  and  $C_{th-IC}$  are the thermal resistance and capacitance of integrated circuit respectively.  $R_{th-HP}$  and  $C_{th-HP}$  are the thermal resistance and capacitance of heat pipe respectively.  $R_{th-hsn}$  and  $C_{th-hsn}$  are the thermal resistance and capacitance of specific fin including surface from heat source.  $R_{th-amb}$  is the thermal resistance between the heat sink and the ambient.

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda S} \quad (1)$$

where:  $R_{th}$  is the thermal resistance in  $KW^{-1}$   
 $l$  is the distance between two points in m  
 $S$  is the area in  $m^2$   
 $\lambda$  is the thermal conductivity in  $Wm^{-1}K^{-1}$

$$C_{th} = Mc_p = e\rho Sc_p \quad (2)$$

where:  $C_{th}$  is the thermal capacitance in  $J K^{-1}$   
 $M$  is the mass in kg  
 $c_p$  is the specific heat in  $Jkg^{-1}K^{-1}$   
 $\rho$  is the density in  $kg m^{-3}$   
 $e$  is the thickness of material in m

Hence, the resistance between the heat sink and ambient may be obtained by using the formula bellow [2].

$$R_{amb} = \frac{1}{hS} \quad (3)$$

where:  $R_{amb}$  is ambient thermal resistance in  $KW^{-1}$   
 $h$  is the general convection coefficient in  $Wm^{-2} K^{-1}$

The unsteady state thermal effect of each element in electronic system depends on its own temperature and the temperature of neighboring elements. Therefore, the Spice model focus on duality between thermal and electrical parameters could be used to prove the advantage of our idea to use additional temperature sensor on the edge of heat sink. In the beginning let's define a time shift, the time shift (TS) value is the duration of almost constant temperature close to the critical thermal threshold on the chip surface while accelerating the frequency generator or increasing voltage supply at the same time (when the cooling efficiency is increasing), Fig.2. Our purpose is to investigate how to increase chip computation efficiency by exploiting current data (from temperature sensor) about cooling system. The simulation performed by Spice provided the TS value versus different parameters such as power absorbed by the heat pipe and pipe diameter. The simulation was performed under variable convection coefficient, with constant power generated by the chip. For its purposes, the heat absorbed/released (latent heat removed) by the fluid in heat pipe was between 10 and 40% of total power generated by the die. Thus the chip is modelled by one resistance, one capacitance and one positive current source. The heat pipe by two resistances, one capacitance and one negative current source whereas every heat fins of heat sink by one resistance and one capacitance. Table1 contains parameters of thermal system.



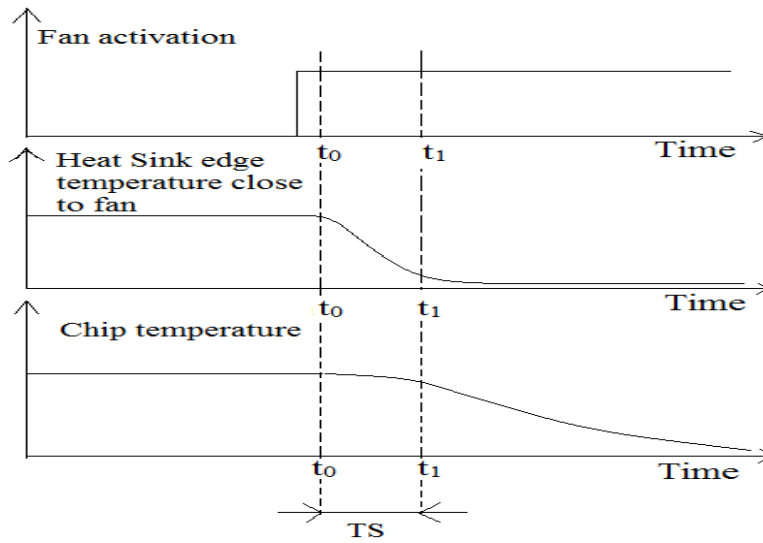


Fig.2 Temperature in different parts of the cooling system. (Quick reaction of heat sink and slow of chip).

Table.1 Parameters of thermal system under investigation.

Parameter Name	Symbol	Values
Heat sink fin thickness	$\varepsilon$	$10^{-3}$ m
Heat sink fin height	$b$	$9 \cdot 10^{-2}$ m
Distance between heat sink fins	$z$	$4 \cdot 10^{-2}$ m
Heat sink base width	$g$	$6 \cdot 10^{-2}$ m
Heat sink base length	$L$	$18 \cdot 10^{-2}$ m
Base thickness	$\beta$	$2 \cdot 10^{-2}$ m
thermal conductivity of heat sink	$\lambda$	$205 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Heat pipe parameters	$\lambda^p$ ; $c_p^p$ ; $\rho^p$ ; its diameter length and thickness are respectively	$25000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; $390 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ; $8901 \text{ kgm}^{-3}$ ; 4; 6; 8; $10 \cdot 10^{-3}$ m; $15 \cdot 10^{-2}$ m and $5 \cdot 10^{-4}$ m
Convection coefficient(free and forced)	$h$	10 and $100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Power dissipated in chip and chip dimension	$P$	10 W and $30 \times 30 \times 6 \cdot 10^{-3}$ m
Density of heat sink	$\rho$	$2707 \text{ kg m}^{-3}$
Specific heat of heat sink	$c_p$	$894 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

The TS will be used for describing the time required to keep the chip temperature constant near critical thermal threshold while accelerating the clock frequency. The time shift values were calculated versus different parameters: power absorbed or released by the heat pipe and pipe diameter thus the detailed algorithm of TS calculation is described in the next section.

#### 4. Detailed time shift computation algorithm

The heat generated inside a chip placed in adiabatic environment is rejected into surrounding air via heat pipe and heat sink. As shown in Fig.3 the step by step calculation method of thermal parameters was based on some analytical equations. Their values were used in RC circuit and the simulation varying convection coefficient versus time was performed by an electrical simulator (computer program) called LTspiceIV. The analogies existing between electrical and thermal parameter enable the observation of TS value from the electrical circuit simulator's results. The simulation results are presented in the next section.

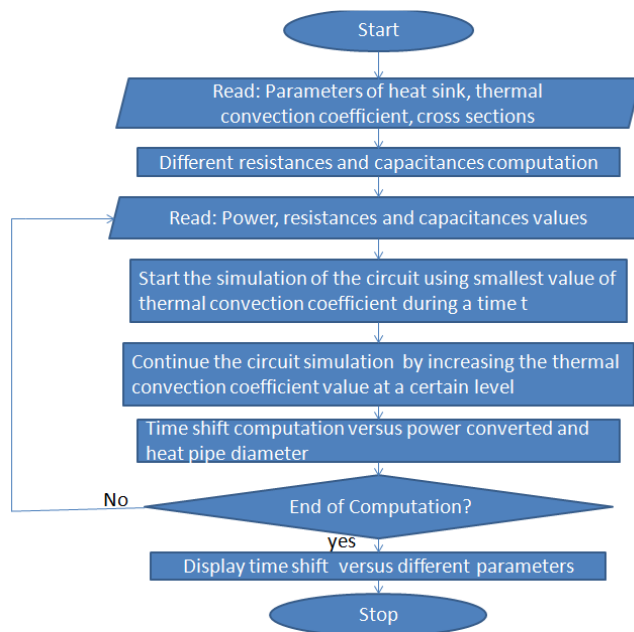


Fig.3 Algorithm of time shift computation

#### 5. Result and discussion

Owing to the chip location (adiabatic environment), its cooling depends on heat pipe and heat sink thus the TS may occur when the thermal convection coefficient is raised at heat sink level. The thermal control of microsystem (micro-processor) contains turning on the fan close to the heat sink when the integrated circuit temperature reaches a certain level. This act automatically decreases the heat sink temperature while maintaining the constant temperature close to critical thermal threshold on the chip surface for a significant period of time. The time shift versus power (heat) absorbed/ released by the fluid inside heat pipe

and pipe diameter may be visualized in Fig.4. The TS increases with power absorption by the fluid and pipe diameter. Both of them characterize the heat transfer capability of the heat pipe. Hence, an enhancement of cooling condition leads to rising TS. Finally, we conclude that the TS is proportional to cooling efficiency. The thermal compact model utilized is composed of elements required only for observation of time shift. The presented investigation focused on time shift phenomenon depending on the cooling efficiency could be a way to control chip operating frequency/voltage.

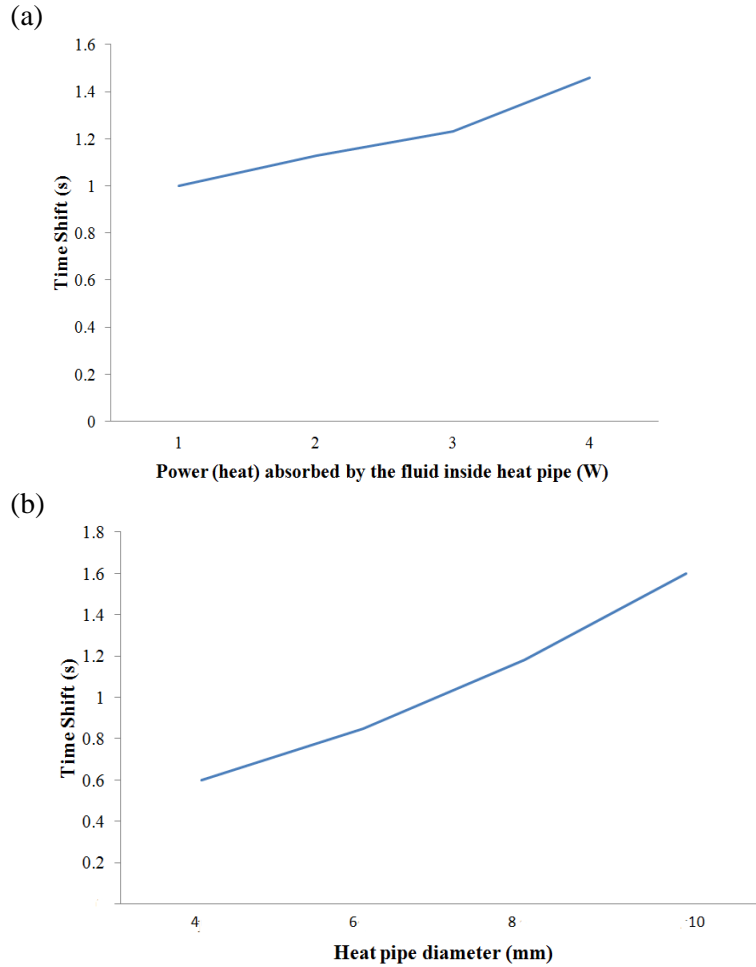


Fig.4 Time shift versus (a) power absorbed by heat pipe (b) diameter of heat pipe  
(Note that the heat pipe's length  $l = 150$  mm and the thickness  $d = 0.5$  mm)

## 6. Conclusion

In this paper, the presented work shows the feasibility of frequency/voltage control using the information about cooling efficiency. Owing to this, in a significant period of time, the clock frequency generator may be accelerated while maintaining the chip operating temperature constant and close to the critical thermal threshold without any delay. In most cases, the clock frequency and voltage are controlled versus the information indicated by the temperature sensors located inside the chip. Remark that each reduction of operating frequency and voltage provokes an increase of the task execution time.

The thermal compact model based on analogy between thermal and electrical parameters enables the observation of time shift scenario in electronic systems. The approach presented in this paper doesn't require any microarchitectural changes of the system, the only exigency is the attachment of one additional temperature sensor at the edge of heat sink thus, its applicability might be simple and easy. The results might be useful for achieving the microsystem throughput improvement by accelerating the clock generator frequency or increasing voltage supply over sufficient period of time. Finally, the maximum data processing of die can be achieved without any thermal violation.

**Acknowledgment:** The authors would like to express sincere gratitude to the National Science Centre for financial support, project grant FALCON 2014/13/B/ST7/01634.

## References

- [1] Coskum A. K., Ayala J. L., Atienza D., Rosing T. S. "Modeling and Dynamic Management of 3D Multicore Systems with Liquid Cooling" Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), 2009 17th IFIP International Conference pp.35-40 12-14 October 2009
- [2] Frankiewicz M., Golda A., Kos A. "Investigation of Heat Transfer In Integrated Circuits" Metrology and Measurement Systems, vol.11, No.1, pp.111-120, 2014.
- [3] Kim Y. G., Kim M., Kim J. M., Chung S.W. "M-DTM: Migration-based dynamic thermal management for heterogeneous mobile multi-core processors" Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2015, pp 1533-138, March 2015
- [4] Kos A., De Mey G "Thermal Modelling and optimization of power microcircuits", Electrochemical Publications LTD, ISBN 0901150 3603, England 1997.
- [5] Legierski J., Wiecek B., De Mey G. "Measurements and simulations of transient characteristics of heat pipes" microelectronics reliability, Vol. 46, issue1, pp.109115, January 2006.

- [6] O'Loughlin J., Loree D. "Cooling System Transient Analysis using an Electric Circuit Program Analog" Pulsed Power Conference, 2003. Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International, Volume: 2, pp 767 – 770, June 2003.
- [7] Pounds D., Bonner III R. W. "High Heat Flux Heat Pipes Embedded in Metal Core Printed Circuit Boards for LED Thermal Management" Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2014 IEEE Intersociety Conference on, pp 267-271, May 2014.
- [8] Shaw M.C., Waldrop J. R., Chandrasekaran S., Kagalwala B., Jing X. "Enhanced Thermal Management by Direct Water Spray of High-Voltage, High Power Devices in a Three-phase, 18-hp AC Motor Drive Demonstration" Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002. ITherm 2002. The Eighth Intersociety Conference on, pp. 1007-1014, 2002.
- [9] Stavrou K., Trancoso P. "Thermal-Aware Scheduling: A solution for Future Chip Multiprocessors Thermal Problems" Digital System Design: Architectures, Methods and Tools, 2006. DSD 2006. 9th EUROMICRO Conference on, pp.123 – 126, 2006.
- [10] Székely V., Rencz M., P'ahi A., Courtois B. "Thermal Monitoring and Testing of Electronic systems" IEEE Transactions on components and packaging technology, vol.22, No.2, pp.231-237, June 1999.
- [11] Tockhorn A., Cornelius C., Saemrow H., Timmermann D. "Modeling Temperature Distribution in Networks-on-Chip using RC-Circuits" Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS), 2010 IEEE 13th International Symposium on, pp. 229 – 232, April 2010.
- [12] Tworus K. "Application of Inverse Problems to On-line Temperature Monitoring of Integrated Circuits" 2002.
- [13] Zhang P., Ruan L. "Experimental Study On Two-phase Spray Cooling For The Cooling of High-heat-flux Electronic Chip" 2012 Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012 International Conference on, pp.324-326, March 2012.

## **ZWIĘKSZENIE WYDAJNOŚCI MIKROSYSTEMÓW Z UŻYCIEM NOWEGO SYSTEMU CHŁODZENIA**

### **Streszczenie**

Praca prezentuje nowy sposób sterowania napięciowo-częstotliwościowego procesorów o dużej wydajności numerycznej z wykorzystaniem informacji o bieżącej efektywności chłodzenia. Autorzy zaproponowali metodę sterowania, która lepiej wykorzystuje własności cieplne modułu scalonego w sensie bardziej efektywnego przekazywania ciepła do otoczenia. W tym celu wprowadzono i wyliczono czas przesunięcia (TS) aktywności numerycznej, zdefiniowany jako przedział czasu, w którym system cyfrowy może pracować ze zwiększoną efektywnością bez obawy o przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy. W szczególności, nawet wówczas gdy struktura scalona pracuje na granicy wytrzymałości termicznej. Do analizy termicznej wykorzystano model kompaktowy RC oparty na analogii elektrycznej. Do analizy wykorzystano program Spice. Otrzymane wyniki wskazują, że TS stanowi znaczącą część całkowitego czasu pracy procesora co przekłada się na zwiększenie częstotliwości lub napięcia zasilania, a zatem prowadzi do zwiększenia wydajności procesora.

**Słowa kluczowe:** częstotliwość zegara taktującego, napięcie zasilania, rurki cieplne, czujniki temperatury, wydajność procesora

DOI: 10.7862/re.2016.1

*Tekst złożono w redakcji:* styczeń 2016

*Przyjęto do druku:* marzec 2016







Mateusz MUCHA<sup>1</sup>

## SYSTEM WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI OPARTY O KONTROLER RASPBERRY PI

W artykule przedstawiono system wysokiej rozdzielczości oparty o kontroler Raspberry Pi przeznaczony do prezentacji danych. System zaprojektowany został jako niekosztowna alternatywa dla już istniejących rozwiązań. W przeprowadzonych badaniach w porównaniu do innych urządzeń pod względem wydajności wypada lepiej. Jest on też znacznie bardziej ekonomiczny. Praca opisuje system prezentacji danych, program sterujący, jego funkcjonowanie oraz predefiniowane szablony. Opisany został wygląd przykładowego szablonu oraz różne typy informacji prezentowanych przez system. Raspberry Pi wraz z aplikacją stanowi końcowy, wykonawczy element całego systemu, w skład którego wchodzi również panel administracyjny oraz baza danych.

**Słowa kluczowe:** Raspberry Pi, HMP, QML

### 1. Wprowadzenie

Systemy wysokiej rozdzielczości są przeznaczone dla rozwiązań biznesowych opierających się na prezentacji jak największej ilości informacji w formie multimedialnej na ekranie telewizora. Do prawidłowej oraz wydajnej pracy potrzebują odpowiedniej platformy sprzętowej. Taką platformą okazało się urządzenie Raspberry Pi, będące wydajnym mikrokomputerem wyświetlającym obraz w wysokiej rozdzielczości. Urządzenie o wymiarach karty kredytowej oraz wadze 45 g jest w stanie wyświetlać obraz w rozdzielczości 1920x1080 pikseli przy zachowaniu płynności 30 klatek na sekundę. Aplikacja współpracująca z urządzeniem w pełni wykorzystuje jego możliwości. Urządzenie posiada również wiele scenariuszy oraz trybów pracy. Szatę graficzną opisują szablony wyglądu.

Podobne rozwiązanie skupiające się na prezentacji danych zostało zaprezentowane w pracy [4]. Rozwiązaniem tego typu dysponuje również firma SpinetiX. Opracowała ona zamknięty system prezentacji danych oparty o urządzenia HMP130 i HMP200 [2,3]. Jak podaje producent, urządzenia te mają

---

<sup>1</sup> Mateusz Mucha, Politechnika Rzeszowska, Krasne 10A, 36-007 Krasne, tel. 501252243, email: mateusz.mucha@wp.pl

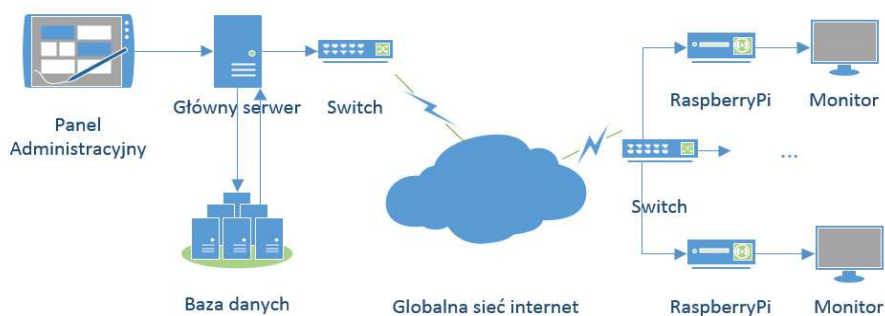
możliwość wyświetlania obrazu FullHD, przy zachowaniu wysokiej częstotliwości odświeżania. W przeciwieństwie do Raspberry Pi urządzenia te są wielkości domowego routera (135x86mm). Zostały stworzone wyłącznie do prezentacji danych i nie pozwalają na ingerencję w oprogramowanie.

Brak możliwości podłączenia klawiatury uniemożliwia bezpośrednie zarządzanie kontrolerem co zmusza do użycia odpowiedniego oprogramowania. Jest to dość poważna wada, ponieważ urządzenie HMP nie może być dowolnie konfigurowane oraz zamyka możliwość rozwoju rozwiązania. Odwrotnie jest w przypadku Raspberry Pi, który jako komputer może być dowolnie konfigurowany.

Kontroler jest wyposażony w układ Broadcom BCM2835 typu *System on a chip* [1]. Oznacza to, że procesor zawiera układ graficzny, pamięć RAM oraz cyfrowy przetwornik sygnału zamknięty w jednym układzie scalonym. Głównym elementem zestawu jest procesor ARM111196JZFS domyślnie taktowany częstotliwością 700MHz. Dzięki temu jest w stanie obsłużyć typowe systemy operacyjne, w tym Linux. Kolejnym komponentem jest układ graficzny VideoCore IV CPU, pozwalający wyświetlić obraz w wysokiej rozdzielczości. W zależności od modułu, Raspberry Pi dysponuje pamięcią RAM 256MB lub 512MB. Dane przechowywane są na karcie SD. Układ Broadcom BCM2835 wraz z układem VideoCore IV GPU, są dość powszechnie stosowaną architekturą sprzętową. Ze względu na wydajność, układ graficzny może obsługiwać bibliotekę OpenCV. Testy takiego układu przedstawia m.in. artykuł [5]. Raspberry Pi został porównany pod względem wydajności do komputera klasy PC Shuttle XS36V, o wymiarach 20x16x3,6 cm [9].

## 2. Opis systemu prezentacji danych

System pokazany na rys.1 można podzielić na dwie części. Taki podział pozwala na globalne rozproszenie, co zwiększa zasięg.



Rys. 1. Schemat systemu

Fig. 1. System diagram

System został zaprojektowany do pracy w sieci lokalnej LAN, jednak jego konfiguracja pozwala na wykorzystanie globalnej sieci Internet i przeniesienie administracji np. do tzw. „chmury”. Tabela 1 przedstawia krótki opis obydwu części.

Tabela 1. Opis części systemu wysokiej rozdzielczości

Table 1. Description of the system high definition

Część 1	Zarządzanie wyświetlaną treścią. Jest to pewnego rodzaju panel administracyjny pozwalający na konfigurację urządzenia bądź urządzeń oraz ustawienia związane z administrowaniem, takie jak przypisywanie ról administracyjnych czy blokowanie dostępu do określonych funkcjonalności. Dodatkowo, w skład wchodzi również serwer bazy danych Microsoft SQL pozwalający na wydajne składowanie danych oraz związane z tym operacje.
Część 2	Część druga odpowiada za wyświetlanie już przesłanej informacji i jest typowo wykonawcza. W jej skład wchodzi urządzenie Raspberry Pi otrzymujące informacje z centralnego serwera oraz urządzenie wyświetlające komunikaty w formie multimedialnej. Zazwyczaj jest to telewizor bądź monitor.

Komunikacja w systemie odbywa się z wykorzystaniem *webserwisów* za pośrednictwem protokołu SOAP. Takie rozwiązanie zwiększa wydajność oraz zapewnia stabilność komunikacji [6], pozwalając na zastosowanie systemu w skali globalnej. Serwer z kontrolerem wymieniają informacje zgodnie z odpowiednim scenariuszami działania. Raspberry Pi może wyświetlać informacje również w trybie *offline*. Wystarczy, że wcześniej informacje zostały pobrane w zwykłym trybie pracy.

System dysponuje predefiniowanymi szablonami wyglądu. Przykładowy szablon przedstawiono na rys 2. Każdy szablon zawiera różne typy informacji wyświetlające inny rodzaj komunikatów. System prezentuje informacje typu:

- Film, prezentacja wideo
- Zdjęcie, pokaz slajdów
- Statyczny pasek informacyjny
- Dynamiczny pasek informacyjny wyświetlający dane z kanału RSS
- *Widgety* HTML pozwalające pokazać dowolne strony.



Rys. 2. Szablon ułożenia poszczególnych elementów

Fig. 2. Template arrangement of individual elements

### 3. Funkcjonowanie systemu

System został zaprojektowany w celu wyświetlania informacji w formie multimedialnej. By dodać odpowiedni komunikat należy wykonać poniższe kroki:

1) Zarejestrować urządzenia Raspberry Pi jako element wyświetlający informacje. Od tego momentu można zarządzać urządzeniem lub grupą urządzeń.

2) Określić układ prezentowanych informacji, które będą wyświetlane. Zostało przygotowane 8 predefiniowanych schematów, które można odpowiednio modyfikować. Nie ma możliwości tworzenia personalizowanych schematów.

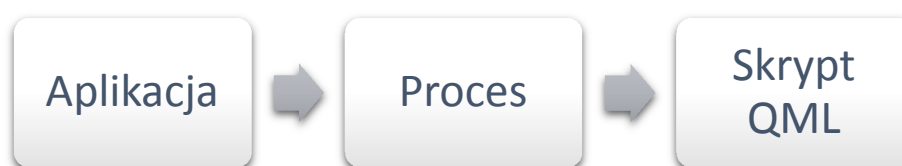
3) Określić zawartości wybranego szablonu. Należy pamiętać, że wszystkie szablony posiadają różnego typu komponenty, z którego każdy przedstawia inny typ informacji.

4) Zdefiniować kolejkę komunikatów, czyli kolejność pokazywania różnych komunikatów dla danego kanału. Każdy z komunikatów ma własny priorytet, co pozwala określić częstotliwość wyświetlania informacji. Dla kanałów statycznych, nie posiadających kolejki, definiuje się jednorazowo źródło danych.

5) Jeżeli dany kanał tego wymaga, zdefiniować listę plików dla kolejki. Przykładowo, definiuje listę filmów reklamowych wyświetlanych po sobie. Każdy komunikat musi mieć informację, priorytet oraz treść w postaci załącznika. Zatwierdzenie takiej konfiguracji oznacza wstawienie jej do kolejki aktualizacji dla danego kontrolera. Urządzenie cyklicznie odpytuje serwer o nową kolejkę komunikatów bądź nowy wygląd. Jeżeli któreś z tych ustawień uległo zmianie, urządzenie automatycznie dostosowuje się do nowych ustawień, do momentu pojawienia się nowych konfiguracji.

#### 4. Program sterujący

Python jako język wysokiego oraz niskiego poziomu okazał się właściwym rozwiązaniem dla głównej aplikacji. Brak potrzeby kompilacji kodu spowodował zwiększenie wydajności Raspberry Pi [7]. Program główny wykorzystuje w wysokim stopniu środowisko Linux. Graficzne szablony komunikatów zostały napisane w języku QML, będącym częścią środowiska Qt, dedykowanym na urządzenia wbudowane oraz cechującym się wysoką prędkością działania [8]. Główne zastosowanie język QML znalazł w telefonach Nokia pracujących w systemie Symbian. Pliki filmowe są odtwarzane za pomocą programu OMX Player, przeznaczonego specjalnie na platformę Raspberry Pi. Takie rozwiązanie zwiększyło wydajność całego systemu oraz przeniosło najbardziej wymagającą część, jaką jest wyświetlanie plików filmowych w jakości fullHD na układ VideoCore IV GPU, zaprojektowany właśnie dla takich operacji.



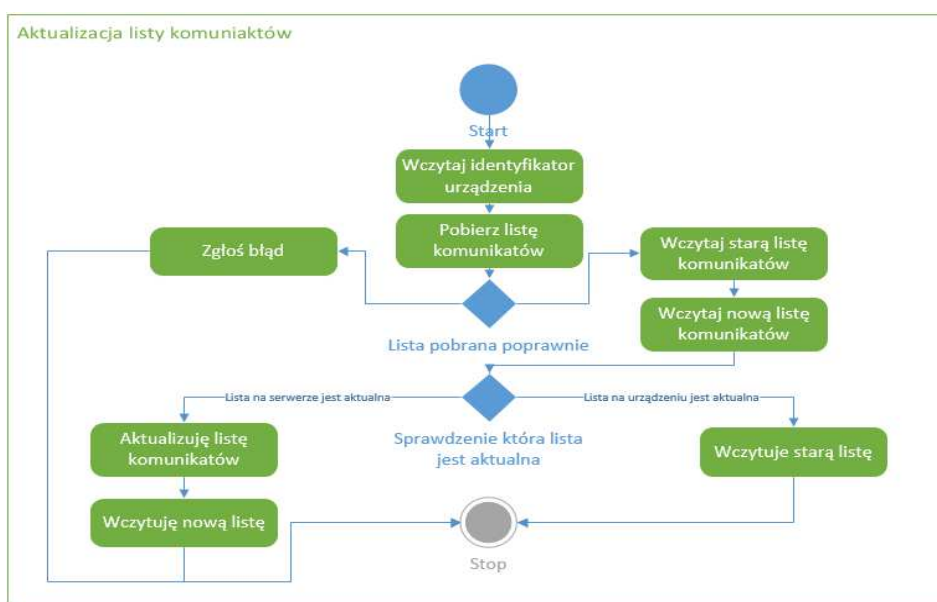
Rys. 3. Schemat uruchomienia procesów graficznych

Fig. 3. Scheme run graphical processes

Aplikacja sterująca pośredniczy pomiędzy panelem administracyjnym a środowiskiem systemu Linux. Wszystkie akcje odbywają się na zasadzie tworzenia nowych procesów w określonej kolejności. Przebieg ten prezentuje rys. 3. Procesy odpowiedzialne za wyświetlanie grafiki tworzą złudzenie istnienia warstw. Przy odpowiedniej konfiguracji uzyskuje się efekt niezauważalnych przejść pomiędzy odpowiednimi scenami. Dodatkowo takie rozwiązanie pozwala całą logikę odpowiedzialną za „życie procesu” przenieść

na system operacyjny, a działanie aplikacji opiera się na powoływaniu nowego procesu z odpowiednimi parametrami oraz na zakończeniu jego działania.

Funkcjonowanie programu sterującego opiera się na odpowiednich scenariuszach działania. Aplikacja posiada zaimplementowane rozwiązania pozwalające odpowiednio zachować się w każdej sytuacji. Rysunek 4 przedstawia algorytm postępowania w przypadku aktualizacji komunikatów. Kluczym aspektem jest identyfikator. Dzięki niemu jest możliwe rozpoznanie konkretnego urządzenia w sieci. Po identyfikacji zostaje sprawdzona globalna kolejka komunikatów, czy dla danego urządzenia nastąpiły modyfikacje, też nie. Jeżeli nie było zmian, to aplikacja działa dalej. Jeżeli natomiast, wystąpiła zmiana, to zostaje pobrana nowa kolejka komunikatów i posortowana według kolejności wyświetlania. Jeżeli podczas tego procesu wystąpi błąd, to automatycznie zostaje zapisany w globalnym systemie, a urządzenie wchodzi w serwisowy tryb pracy.



Rys. 4. Diagram przedstawia aktualizację listy komunikatów

Fig. 4. This diagram shows the update of the list of messages

Tabela 2 przedstawia przykładowy scenariusz uruchomienia aplikacji. Należy założyć, że wcześniej została zdefiniowana kolejka komunikatów, a konfiguracja wyglądu nie została zmieniona.

Tabela 2. Przykładowy scenariusz uruchomienia aplikacji

Table 2. An example scenario to launch the application

Krok	Opis
1	Pobieranie listy potrzebnych załączników
2	Sprawdzanie listy czy nie znajdują się w niej większe pliki które należy pobrać. Jeżeli tak, to aplikacja pobiera je z centralnego serwera
3	Docelowe uruchamianie grafiki
4	Uruchamianie procesu odpowiedzialnego za tło
5	Ustawianie wygenerowanej grafiki jako tła ekranu
6	Uruchamianie procesów odpowiedzialnych za wyświetlanie komunikatów

Wszystkie typy komunikatów za wyjątkiem pliku filmowego posiadają następujące pliki sterujące:

1) Główny plik pobierający parametry startowe od głównego procesu sterującego oraz przekazujący je do odpowiedniego pliku opisującego grafikę.

2) Plik QML opisujący grafikę, zdefiniowany dla odpowiedniego typu komunikatu.

Odtwarzanie pliku filmowego jest możliwe za pomocą powołania procesu *OMX playera* z odpowiednimi ustawieniami konfiguracji. Aplikacja posiada scenariusze, które opisują zachowanie w przypadku braku dostępu do Internetu, serwisu urządzenia, czy pobraniu konfiguracji i listy komunikatów jednocześnie.

## 5. Badania i porównania

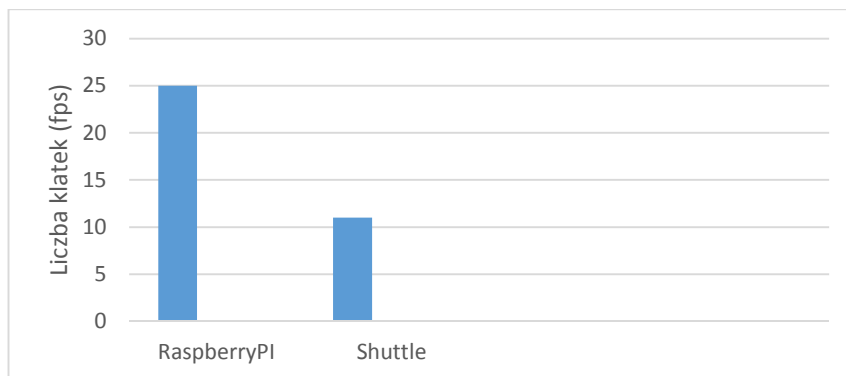
System wysokiej rozdzielczości jest rozwiązaniem prototypowym. Jego działanie przedstawia rys. 5. Widać na nim obraz w rozdzielczości FullHD oraz dodatkowe informacje. Układ ekranu został zdefiniowany za pomocą odpowiedniego szablonu w skład którego wchodzi statyczny pasek informacyjny umieszczony w górnej części szablonu i dolny pasek informacyjny przedstawiający dane z kanału RRS pobierane w czasie rzeczywistym. Pasek prezentuje dane w formie animowanej. W prawej części szablonu znajduje się *widget* pogody pobierający informacje dla określonej lokalizacji z serwisów pogodowych. W centralnej części widać plik multimedialny dostosowany wymiarami do odpowiedniego miejsca w szablonie. Każdy z wyżej wymienionych komponentów działa niezależnie, co świadczy o wielowątkowość aplikacji.



Rys. 5. Wygląd działającego systemu komunikatów

Fig. 5. Appearance acting messaging system

Jednym z głównych elementów systemu wysokiej rozdzielczości jest aplikacja zaprojektowana tak by działać w środowisku Linux. Dzięki temu możliwe jest uruchomienie jej na *dowolnym* urządzeniu. Kolejne badanie pokaże porównanie urządzenia Raspberry Pi oraz Shuttle pod względem wydajności. Rysunek 6 przedstawia zestawienie *liczby* klatek na sekundę obu tych urządzeń. Z zestawienia wynika iż mimo niższych osiągnięć Raspberry Pi wypadł lepiej. Jest to spowodowane posiadaniem sprzętowego kodeka h.264/MPEG-4 AVC [1]. Dzięki niemu możliwe jest *przekształcenie strumienia danych w sygnał audio i wideo*. Podobne testy zostały przeprowadzone w pracy magisterskiej *Klient Systemu Komunikatów OPTeam*[10].



Rys. 6. Porównanie wydajności urządzeń

Fig. 6. Comparison of equipment performance



## 6. Podsumowanie

Pokazano że kontroler Raspberry Pi nadaje się do rozwiązań związanych z prezentacją obrazu. Wbudowane komponenty sprzętowe takie jak procesor Broadcom BCM2835 pozwalają na wydajne wyświetlanie obrazu przy zachowaniu płynności. Istnieją również inne systemy tego typu takie jak urządzenia HMP130 oraz HMP200 firmy SpinetiX , ale ich koszt jest znacznie wyższy. Zastosowanie różnych szablonów graficznych oraz płynność odtwarzania filmów w wysokiej rozdzielczości tworzą z Raspberry Pi wydajną platformę sprzętową. Cały system dzięki swojej strukturze może pracować w środowisku rozproszonym, co zwiększa zasięg działania. Zastosowanie bazy danych Microsoft SQL poprawia wydajność systemu i pozwala na wykorzystywanie materiałów filmowych zajmujących kilkaset megabajtów. Raspberry Pi jest propozycją rozwiązania do prezentacji danych. Stworzenie systemu wysokiej rozdzielczości było kontynuacją już istniejącego rozwiązania opartego na PC, tyle że bazującego na innej platformie programowej. Nowy system jest znacznie tańszy. System wysokiej rozdzielczości oparty o mikrokontroler Raspberry Pi może być alternatywą dla rozwiązania opartego o zwykłe komputery klasy PC. Ponieważ Raspberry Pi w znacznym stopniu różni się cenowo od urządzeń mających działanie identycznego systemu, zostało przetestowane również na komputerze ShuttleXS36V. Ponieważ aplikacja działa w środowisku Linux, niezbędne były narzędzia programistyczne takie jak edytor Eclipse do sprawnego pisania kodu, czy QtCreator do sprawniej edycji plików QML. Zastosowanie języka Python dało prostą możliwość edycji kodu źródłowego projektu bez jego kompilacji. Poza tym, jako język wysokiego poziomu, Python zwiększa wydajność całego systemu.

## Literatura

- [1] Eben Upton: Raspberry Pi User Guide Wiley 2013
- [2] Spinetix: Product Brief, SpinetiX HMP130  
[http://www.spinetix.com/sites/default/files/documentation/SpinetiX\\_ProductBrief\\_HMP130\\_English.pdf](http://www.spinetix.com/sites/default/files/documentation/SpinetiX_ProductBrief_HMP130_English.pdf)
- [3] Spinetix: Product Brief, SpinetiX HMP200,  
[http://www.spinetix.com/sites/default/files/documentation/SpinetiX\\_ProductBrief\\_HMP200\\_English.pdf](http://www.spinetix.com/sites/default/files/documentation/SpinetiX_ProductBrief_HMP200_English.pdf)
- [4] Bonganay, A.C.D. ; Magno, J.C. ; Marcellana, A.G. ; Morante, J.M.E. ; Perez, N.G.: Automated electric meter reading and monitoring system using ZigBee-integrated raspberry Pi single board computer via Modbus, Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2014 IEEE Students' Conference onDOI:
- [5] Abaya, W.F. ; Basa, J. ; Sy, M. ; Abad, A.C. ; Dadios, E.P.: Low cost smart security camera with night vision capability using Raspberry Pi and OpenCV, Humanoid,

- Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2014 International Conference on
- [6] Kwong Yuen Lai ; Thi Khoi Anh Phan ; Tari, Z. Efficient SOAP binding for mobile Web services Local Computer Networks, 2005. 30th Anniversary.
- [7] Allen B. Downey: Think Python, O,Reilly 2014.
- [8] Paimen, L. ; Pohjalainen, P. : Case study: QML for the web, Web Systems Evolution (WSE), 2011 13th IEEE International Symposium on
- [9] Slim PC System: XS 36V-703 , Shuttle Computer Handels GmbH, Product Specification, www.shuttle.com
- [10] Mateusz Mucha: praca magisterska Klient Systemu Komunikatów OPTeam, 2014

## **HIGH-RESOLUTION SYSTEM BASED ON THE RASPBERRY PI CONTROLLER**

### **S u m m a r y**

The paper presents high-resolution system based on Raspberry Pi controller developer for data presentation. The system has been designed as an inexpensive alternative to existing systems. The device is a final, executive part of the whole system, which includes administration panel and database. The system has various kinds of data presentation channels including channel video or multimedia RRS bar. Application of the resulting works on the principle of integration with Linux, so, a certain part of the functionality is transferred to the operating system. Python is main language in which the application has been created. Auxiliary language is a language describing graphics QML which greatly increases the efficiency of the system. FullHD videos are run through, OMX player program takes full advantage of the device Raspberry Pi.

**Keywords:** Raspberry Pi, HMP, QML

DOI: 10.7862/re.2016.2

*Tekst złożono w redakcji:* styczeń 2016

*Przyjęto do druku:* marzec 2016

Kamil SIDOR<sup>1</sup>

## ZASTOSOWANIE METOD EKSPLOKACJI DANYCH DO WSPOMAGANIA PRZYGOTOWANIA PROCESU DYDAKTYCZNEGO

Eksploracja danych dostarcza cennej wiedzy ukrytej w dużych zbiorach danych. Pozwala na odkrywanie zależności niewidocznych gołym okiem. Swoje zastosowanie może znaleźć także w edukacji podczas przygotowywania oferty dydaktycznej. Artykuł przedstawia zastosowanie algorytmów eksploracji danych w przygotowaniu procesu edukacyjnego. W rozważanym zakresie eksploracja danych służy do przekształcania surowych danych w wiedzę, która pozwala na poznanie preferencji studentów. Skupiono się na odkrywaniu grup studentów oraz tworzeniu ich modeli określających style uczenia się. W trakcie budowania grup zastosowano klasyfikację bez nadzoru m.in. metody k-średnich oraz EM. Grupy tworzone były z uwzględnieniem preferencji studentów dotyczących nauki. Pozwoliło to na uzyskanie grup zawierających studentów o podobnych stylach uczenia się. Do zweryfikowania poprawności klasyfikacji wykorzystane zostały indeksy walidacyjne, które pozwoliły na wybranie najbardziej efektywnego podziału studentów. Badania przeprowadzono na danych zebranych wśród studentów Politechniki Rzeszowskiej na podstawie ankiety zawierającej kwestionariusz ILS. Uzyskane podczas badań wyniki pozwoliły na określenie ile różnorodnych materiałów dydaktycznych należy przygotować, aby były dopasowane do preferencji studentów różnych grup. Poznanie stylów uczenia się studentów pozwala nauczycielowi na lepsze zrozumienie upodobań studentów, a samym uczniom na dopasowanie materiałów do własnego stylu uczenia, dzięki czemu łatwiej i szybciej przyswajają wiedzę.

**Słowa kluczowe:** data mining, ILS, style uczenia się, klasyfikacja, k-means, EM, odkrywanie wiedzy, proces dydaktyczny

### 1. Wprowadzenie

Jak mówi definicja, „proces dydaktyczny (proces kształcenia, proces nauczania) to intencjonalny, świadomy, prawidłowy i przebiegający regularnie ciąg czynności nauczycieli i uczniów, ukierunkowany na opanowanie przez uczniów

---

<sup>1</sup> Kamil Sidor, Katedra Automatyki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2 35-959 Rzeszów, email: ksidor@prz.edu.pl

wiedzy o świecie, kształtowanie umiejętności i nawyków, rozwijanie zdolności i zainteresowań, kształtowanie przekonań i postaw, a także na realizację innych założonych celów dydaktycznych” [10]. Proces dydaktyczny składa się z następujących po sobie ogniw. Jednym z najtrudniejszych jest zaznajamianie studentów z nowym materiałem. Wymaga to od nauczyciela przygotowania materiałów dydaktycznych tak, aby w jasny i zrozumiały sposób przekazywały wiadomości. Nauczyciel powinien być nie tylko ekspertem z dziedziny, której uczy, ale także ekspertem od nauczania – potrafiącym przekazać wiedzę studentom w nieskomplikowany dla nich sposób [11].

Dostosowanie sposobu przekazywania wiedzy uczniom to niezwykle trudne zadanie. Nie można go zrealizować prowadząc wykład, gdzie jest 100 studentów i jeden prowadzący. Realizacja dostosowania sposobu przekazywania wiedzy ma większy sens wraz z zastosowaniem e-learningu, który zyskał dużą popularność. Punktem wyjścia w przygotowaniu materiałów wykorzystywanych w e-learningu jest identyfikacja stylów uczenia się odbiorców. Materiały przygotowane z uwzględnieniem stylów uczenia się są w szybszy sposób przyswajane przez uczniów i nie zniechęcają ich do nauki [3].

Osoby odpowiedzialne za proces uczenia podkreślają, że istotnym czynnikiem oddziałującym na jakość uczenia jest dotychczas zdobyta wiedza oraz umiejętności ucznia [3]. Jednakże proces uczenia się jest bardzo skomplikowanym zjawiskiem łączącym wiele zależnych od siebie czynników.

## 2. Style uczenia

Warto rozpatrzeć zagadnienie stylów uczenia się z dwóch perspektyw – nauczyciela i ucznia. Każdy człowiek uczy się w unikatowy dla siebie sposób. Często technika uczenia się jest mieszaniną różnych stylów. Z kolei nauczyciele nie zawsze prezentują wiedzę w najbardziej satysfakcjonujący sposób dla uczniów. Takie niedostosowanie sposobu przekazywania wiedzy do stylu uczenia się studentów nieraz prowadzi do niepowodzeń w kształceniu.

Niejednokrotnie uczniowie twierdzą, że nie potrafią się samodzielnie uczyć. W większości przypadków wynika to z niezajomości własnego stylu uczenia się. W przypadku małych grup, nauczyciel może bliżej poznać uczniów i ich charakter. W przypadku dużych grup studentów, nauczyciel nie ma możliwości poznania studentów, a tym bardziej ich upodobań. Z kolei studenci korzystający z e-learningu są całkowicie nieznanymi i anonimowymi dla nauczyciela. Użyteczne mogą się tutaj wydawać style uczenia się. Tego typu informacja może być pomocna nie tylko dla nauczycieli, ale i dla uczniów, którzy mogą korzystać z najlepiej dopasowanych dla siebie materiałów.

Preferencje i cechy charakterystyczne studentów uzyskuje się zwykle na podstawie wypełnionych przez nich różnego rodzaju kwestionariuszy. Do naj-

częściej używanych atrybutów studentów należą ich indywidualne style uczenia się [13].

Wpływ stylów uczenia się na skuteczność nauczania został przedstawiony przez wielu badaczy. Lee [7] pokazał, że style uczenia się studentów wpływają na osiągnięte przez nich wyniki w nauce. Z kolei Graf i Kinshuk [4] zaprezentowali, że studenci o różnych stylach uczenia mają różne potrzeby i preferencje. Natomiast Beaudoin [1] stwierdził, że style uczenia się określają zachowania studentów. Na tej podstawie można stwierdzić, że style uczenia się mogą w przyszłości stanowić bardzo ważny element podczas przygotowania procesu dydaktycznego.

### 3. Ankieta stylów uczenia i zbierania danych

Do przeprowadzenia badań wykorzystane zostały dane zebrane poprzez przeprowadzenie ankiety internetowej wśród studentów Politechniki Rzeszowskiej. Ankieta składała się z kwestionariusza Index of Learning Styles (ILS) oraz 14 dodatkowych pytań. Kwestionariusz stosowany jest do określenia preferencji stylu uczenia się. Sformułowany został przez R.M Feldera oraz L. K. Silvermana. Odnosi się do skrajnych stylów uczenia w czterech kategoriach:

- *Aktywny – Refleksyjny*: określa styl myślenia,
- *Sekwencyjny – Globalny*: określa styl przyporządkowania zjawisk,
- *Dotykowy – Intuicyjny*: określa styl postrzegania nowych zjawisk,
- *Wizualny – Werbalny*: określa styl działania.

Kwestionariusz składa się z 44 rozpoczętych zdań, które należy dokończyć poprzez wybór jednego z dwóch podanych wariantów [2,5]. W przypadku gdy brak jest idealnie dopasowanej odpowiedzi, należy wybrać tę najbliższą prawdy. Ze względu na wybór skrajnych odpowiedzi, pojedyncze wyniki testu mają charakter dwudzielny. Każda z odpowiedzi zawartych w kwestionariuszu oznaczona jest jedną z dwóch wartości: -1 lub 1. Dla przykładu mając pytanie odnoszące się do kategorii *aktywny-refleksyjny*, wartość -1 opisuje odpowiedź charakteryzującą *styl aktywny*, z kolei 1 *styl refleksyjny*. Ostatecznie dla każdej z kategorii liczona jest średnia z wybranych przez respondenta odpowiedzi. Indeks, który jest wynikiem wypełnienia kwestionariusza ILS, przyjmuje wartość nieparzystej liczby całkowitej z przedziału [-11,11], przydzielonej do każdego z czterech wymiarów, np. (-3, -7,-9,-1). W ten sposób każdy student, który wypełnił kwestionariusz ILS może być opisany przez wektor o 4 atrybutach. Dla przykładu wartości ujemne oznaczają *styl aktywny*, *sekwencyjny*, *dotykowy*, *wizualny*, zaś wartości dodatnie *styl refleksyjny*, *globalny*, *intuicyjny*, *werbalny* [13].

W badaniach wykorzystano własne tłumaczenie kwestionariusza, które wykonane zostało z możliwie najwyższą starannością. W tabeli 1. przedstawione

zostały przykładowe pytania kwestionariusza odnoszące się do poszczególnych skrajnych kategorii stylu uczenia.

Tabela 1. Przykłady pytań kwestionariusza ILS

Table 1. Examples of questions questionnaire ILS

Styl	Kategoria stylu	Przykład
Myślenia	Aktywny (akt)	<i>Pracując w grupie nad trudnym materiałem będę proponował rozwiązania.</i>
	Refleksyjny (ref)	<i>Pracując w grupie nad trudnym materiałem będę słuchał rozwiązań innych.</i>
Przyporządkowania zjawisk	Globalny (glo)	<i>Łatwiej mi zrozumieć całą strukturę tematu, nie pamiętać o szczegółach.</i>
	Sekwencyjny (sek)	<i>Łatwiej mi zrozumieć szczegóły tematu, i mieć rozmyty ogół.</i>
Postrzegania nowych zjawisk	Dotykowy (dot)	<i>Uważam, że łatwiej uczyć się faktów.</i>
	Intuicyjny (int)	<i>Uważam, że łatwiej uczyć się pojęć.</i>
Działania	Wizualny (wiz)	<i>Kiedy podczas zajęć widzę diagram, najprawdopodobniej zapamiętam obraz diagramu.</i>
	Werbalny (wer)	<i>Kiedy podczas zajęć widzę diagram, najprawdopodobniej zapamiętam to, co mówił na jego temat prowadzący zajęcia.</i>

#### 4. Analiza danych

Badania przeprowadzone zostały na 621 próbkach, gdzie każda z próbek reprezentowała jednego studenta. Podczas badań skupiono się na odkrywaniu grup studentów. Podział studentów przeprowadzony został z wykorzystaniem klasyfikacji bez nadzoru. Wykorzystane zostały następujące algorytmy:

- k-średnich z euklidesową funkcją odległości,
- k-średnich z miejską funkcją odległości,
- EM (Expectation Maximization) [6,8,14].

Algorytm k-średnich należy do najbardziej popularnych algorytmów grupowania. W grupowaniu wykorzystuje miarę odległości pomiędzy obiektami (zazwyczaj euklidesową lub miejską). W przeciwieństwie do algorytmu

k-średnich, algorytm EM przydziela każdy obiekt do klastra zgodnie z prawdopodobieństwem przynależności [8,14].

Liczba zróżnicowanych materiałów dla studentów tworzona przez nauczycieli nie może być bardzo duża. Z tego względu studenci byli dzieleni każdym algorytmem na 2, 3, 4 i 5 grup. Oznacza to, że maksymalna liczba zróżnicowanych materiałów do przygotowania przez nauczyciela nie będzie większa od 5.

W badaniach wykorzystane zostało środowisko WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis). WEKA zawiera pakiet algorytmów uczenia maszynowego przeznaczony do zastosowań związanych z eksploracją danych. Oprogramowanie to jest dostępne na licencji GNU General Public License.

#### 4.1. Algorytm k-średnich z euklidesową funkcją odległości

Wyniki grupowania algorytmem k-średnich z euklidesową funkcją odległości zostały przedstawione w tabeli 2. Tabela przedstawia liczebność każdej z grup oraz średnie wartości atrybutów w poszczególnych grupach.

Tabela 2. Wyniki grupowania studentów metodą k-średnich z euklidesową funkcją odległości

Table 2. The results of grouping students k-means (Euclidean distance)

Liczba grup	Liczba studentów	Średnie			
		akt_ref	dot_int	wiz_wer	sek_glo
2	378	-5,11	-5,16	-8,33	-2,58
	243	-0,46	-3,90	-3,32	-1,45
3	209	-5,06	-1,95	-7,27	0,17
	177	0,06	-4,60	-2,48	-2,24
	235	-4,24	-7,14	-8,51	-4,11
4	187	-5,97	-2,10	-7,32	-0,02
	119	1,71	-3,13	-6,19	-1,07
	206	-4,57	-7,26	-8,45	-4,61
	109	-1,71	-5,84	-1,02	-2,27
5	166	-5,90	-3,02	-7,93	0,83
	110	-0,18	-1,71	-6,69	-3,18
	141	-5,54	-7,07	-9,07	-5,57
	135	-1,35	-7,59	-4,64	-2,57
	69	-1,14	-2,71	0,01	0,25

Na podstawie grupowania możemy stwierdzić, że algorytm k-średnich z euklidesową funkcją odległości utworzył grupy o różnej liczebności. Niezależnie od liczby tworzonych grup, liczebność poszczególnych klastrów jest zróżnicowana.

## 4.2. Algorytm k-średnich z miejską funkcją odległości

Kolejną wykorzystaną metodą klasyfikacji był algorytm k-średnich z miejską funkcją odległości. W tabeli 3 przedstawione zostały wyniki grupowania.

Tabela 3. Wyniki grupowania studentów metodą k-średnich z miejską funkcją odległości

Table 3. The results of grouping students k-means (Manhattan distance)

Liczba grup	Liczba studentów	Średnie			
		akt_ref	dot_int	wiz_wer	sek_glo
2	407	-5	-5	-7	-1
	214	-1	-3	-5	-5
3	226	-3	-5	-7	1
	170	-1	-3	-3	-5
	225	-5	-7	-9	-3
4	197	-3	-5	-7	1
	161	-1	-3	-5	-5
	197	-5	-7	-9	-3
	66	-3	-9	-1	-3
5	166	-5	-3	-7	1
	115	-1	-3	-5	-5
	169	-5	-7	-9	-3
	96	-3	-9	-5	-3
	75	-1	-5	-1	-1

Podobnie jak w przypadku budowania grup z euklidesową funkcją odległości, utworzone grupy posiadają zróżnicowaną liczebność studentów.

## 4.3. Algorytm maksymalizacji wartości oczekiwanej

Ostatnim wykorzystanym algorytmem klasyfikacji był algorytm EM, czyli algorytm maksymalizacji wartości oczekiwanej. Wyniki grupowania zostały przedstawione w tabeli 4.

Podobnie jak w dwóch poprzednich algorytmach, także i w tym występuje duże zróżnicowanie liczebności studentów w grupach.

W kolejnym kroku jakość otrzymanych klastrów została porównana z wykorzystaniem indeksów walidacyjnych.



Tabela 4. Wyniki grupowania studentów metodą EM

Table 4. The results of grouping students by EM

Liczba grup	Liczba studentów	Średnie			
		akt_ref	dot_int	wiz_wer	sek_glo
2	328	-4,70	-5,19	-8,80	-2,55
	293	-2,04	-4,20	-4,22	-1,77
3	331	-1,94	-4,43	-4,31	-1,93
	134	-5,34	-2,71	-8,29	-0,66
	156	-4,47	-7,18	-9,38	-4,16
4	296	-1,99	-4,25	-4,05	-2,04
	108	-2,94	-6,71	-8,30	-1,11
	135	-5,58	-2,62	-8,37	-0,76
	82	-4,96	-7,45	-9,80	-6,35
5	217	-2,49	-5,64	-4,80	-3,53
	88	-4,90	-7,33	-10,04	-6,08
	150	-5,88	-2,85	-8,29	-0,93
	96	-1,24	-2,39	-3,30	0,27
	70	-2,24	-6,48	-8,70	-0,14

#### 4.4. Oszacowanie poprawności wyników grupowania

W celu oszacowania poprawności klasyfikacji każdego z zastosowanych algorytmów klasteryzacji zostały wyznaczone indeksy pozwalające ocenić efektywność przeprowadzonej analizy. Były to indeksy: Gamma, Silhouette, Dunna.

Pierwszy z zastosowanych wskaźników to indeks Gamma. Podczas jego obliczania porównuje się odległości wewnątrzklasowe z wszystkimi odległościami międzyklasowymi. Liczba tych porównań to iloczyn liczby odległości wewnątrzklasowych oraz liczby odległości międzyklasowych. Jeśli odległość wewnątrzklasowa jest mniejsza od odległości międzyklasowej to para taka uznawana jest jako zgodna, w przeciwnym wypadku jako niezgodna. W przypadku równości odległości nie są uwzględniane. Wartość indeksu Gamma obliczana jest wg. wzoru:

$$\text{Gamma} = \frac{s(+)-s(-)}{s(+)+s(-)} \quad (1)$$

gdzie:

$s(+)$  – liczba par zgodnych,

$s(-)$  – liczba par niezgodnych .

Indeks może przyjmować wartości z przedziału  $\langle -1,1 \rangle$ . Większa wartość indeksu odpowiada lepszemu grupowaniu [12].

Kolejnym zastosowanym wskaźnikiem był indeks Silhouette. Obliczany jest na podstawie średnich odległości każdego obiektu od obiektów klasy do której należy oraz obiektów z klasy położonej najbliżej. Indeks Silhouette obliczany jest według wzoru:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i); b(i)\}}, \quad (2)$$

gdzie:

$a(i)$  – średnia odległość obiektu  $i$  od pozostałych obiektów klasy  $P_r$ ,

$b(i)$  – średnia odległość obiektu  $i$  od obiektów należących do klasy  $P_s$ .

Używane średnie odległości  $a(i)$  i  $b(i)$  obliczane są na podstawie wzorów:

$$a(i) = \frac{\sum_{k \in P_r} d_{ik}}{n_r - 1}, \quad (3)$$

gdzie:

$d_{ik}$  – odległość obiektu  $i$  od obiektu  $k$  należącego do klasy  $P_r$ ,

$n$  – liczba obiektów należących do klasy  $P_r$ .

$$b(i) = \min \left( \frac{\sum_{k \in P_s} d_{ik}}{n_s} \right), \quad (4)$$

gdzie:

$d_{ik}$  – odległość obiektu  $i$  od obiektu  $k$  należącego do klasy  $P_s$ ,

$n$  – liczba obiektów należących do klasy  $P_s$ .

Indeksy  $S(i)$  są następnie uśredniane dla klas, a następnie uśredniane są dla całego zbioru. Wartość średnia indeksu dla klasy  $P$  oznacza się jako  $S(P)$  i obliczana jest według wzoru [12]:

$$S(P) = \frac{\sum_{i \in K} S(i)}{n_k}. \quad (5)$$

Uśredniony indeks Silhouette dla całego zbioru oblicza się według wzoru:

$$S = \frac{\sum S(P)}{n}. \quad (6)$$

Ostatnim wykorzystanym wskaźnikiem był indeks Dunna, który definiowany jest przez dwa parametry:

- średnicę  $diam(S_i)$  klastra  $S_i$  – odległość między najdalszymi obiektami w danym klastrze,
- zbiór odległości  $\delta(S_i, S_j)$  – minimalna odległość pomiędzy obiektami klastra  $K_i$  i  $K_j$ .

Obliczany jest na podstawie wzoru:

$$Dunn = \min_{1 \leq i \leq m} (\min_{1 \leq j \leq m, i \neq j} (\frac{\delta(C_i, C_j)}{\max_{1 \leq k \leq m} diam(S_k)})) \quad (7)$$

Większe wartości wskaźnika Dunna odpowiadają lepszemu grupowaniu, gdzie klastry są zwarte i oddzielone od siebie [9].

Wyniki wyznaczonych indeksów walidacyjnych dla poszczególnych algorytmów zostały przedstawione w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości indeksów walidacyjnych

Table 5. Validation index values

Algorytm grupowania	2 grupy	3 grupy	4 grupy	5 grup
<b>Indeks Gamma</b>				
k-średnich (f. Euklides)	0,4122	0,4811	0,5392	<u>0,5441</u>
k-średnich (f. miejska)	0,4009	0,4340	0,4278	0,4934
EM	0,3926	0,4464	0,4427	0,4802
<b>Indeks Silhouette</b>				
k-średnich (f. Euklides)	0,1991	0,2234	0,2453	<u>0,2471</u>
k-średnich (f. miejska)	0,2083	0,1951	0,2238	0,2133
EM	0,2138	0,2106	0,1963	0,2141
<b>Indeks Dunna</b>				
k-średnich (f. Euklides)	0,0807	0,0848	<u>0,0871</u>	<u>0,0871</u>
k-średnich (f. miejska)	0,0407	0,0495	0,0521	0,0521
EM	0,0428	0,0525	0,0550	0,0548

Zastosowane algorytmy walidacji klastrów jednoznacznie wskazały że najbardziej efektywny podział występuje przy klasyfikacji na 5 grup. Jedyne Indeks Dunna był identyczny dla 4 i 5 klastrów. Jednak z zastosowanych algorytmów klasyfikacji najlepszy okazał się algorytm k-średnich z euklidesową funkcją odległości, stąd też podział ten został przyjęty jako najlepszy sposób grupowania spośród wszystkich przeprowadzonych badań.

Tabela 6 przedstawia cechy charakterystyczne dla każdej z grup. Dla większej czytelności wartości numeryczne zostały przedstawione jako wartości kategoryczne.

Tabela 6. Otrzymane cechy charakterystyczne grup

Table 6. The resulting characteristics groups

Grupa	akt_ref	dot_int	wiz_wer	sek_glo
1	akt	dot_int	wiz	sek_glo
2	akt_ref	dot_int	wiz	sek_glo
3	akt	dot	wiz	sek
4	akt_ref	dot	wiz	sek_glo
5	akt_ref	dot_int	wiz_wer	sek_glo

Przedstawione w tabeli 6 wartości kategoryczne pozwalają na szybkie określenie preferencji studentów znajdujących się w danej grupie. Warto zwrócić uwagę na to, że grupy różnią się od siebie przynajmniej jedną charakterystyczną cechą.

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie charakterystycznych cech dla utworzonych grup. W celu wykorzystania powyższych wyników w przygotowaniu materiałów dydaktycznych należałoby wykonać pięć rodzajów materiałów dostosowanych do preferencji studentów znajdujących się w poszczególnych grupach. Dla przykładu materiały dydaktyczne dla pierwszej grupy powinny umożliwiać pracę w grupie, posiadać dużo ilustracji, wykresów, tabel i diagramów.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały badania dotyczące klasyfikacji studentów do grup na podstawie ich stylów uczenia się. Style uczenia się studentów zostały wyznaczone na podstawie danych zebranych z wykorzystaniem ankiety ILS, przeprowadzonej wśród studentów uczelni.

Na podstawie uzyskanych wyników wykonana została klasyfikacja z wykorzystaniem algorytmów klasyfikacji bez nadzoru. Zastosowano algorytmy k-średnich z euklidesową funkcją odległości, k-średnich z miejską funkcją odległości oraz EM. Do oceny jakości klasyfikacji zostały użyte indeksy walidacyjne takie jak: Dunna, Silhouette oraz Gamma. Podczas klasyfikacji najskuteczniejszy okazał się podział studentów na 5 grup z wykorzystaniem algorytmu k-średnich z euklidesową funkcją odległości.

Na podstawie uzyskanych wyników zostały określone cechy charakterystyczne utworzonych grup. Cechy te pozwoliły na poznanie preferencji studentów w konkretnych grupach. Bazując na preferencjach studentów istnieje moż-

liwość przygotowania materiałów dydaktycznych dopasowanych do stylów uczenia się danej grupy. Dzięki temu uczniowie otrzymają materiały, które będą odpowiadały ich stylom uczenia, a co za tym idzie nie zniechęcą się do nauki. Korzyści z poznawania stylów uczenia się studentów może odnieść także nauczyciel. Znając preferencje studentów będzie mógł dostosować swój sposób przekazywania wiedzy.

Wykorzystanie metod analizy danych w przygotowaniu procesu dydaktycznego pozwala na lepsze przygotowanie pomocy naukowych oraz uatrakcyjnienie oferty dydaktycznej. Dziedzina ta jest w fazie intensywnego rozwoju, ale z biegiem czasu może zyskać na popularności i być powszechnie wykorzystywana.

## Literatura

- [1] Beaudoin M.F.: Learning of lurking? Tracking the „invisible” on-line student, *Internet & Higher Educ.* 5, 2002, p.147-155.
- [2] Felder R.M., Silverman L.K.: Learning and teaching styles in engineering education, *Eng. Educ.* 1988, p.674-681.
- [3] Gajewski R.: O stylach uczenia się w I-edukacji, <http://www.e-mentor.edu.pl> [dostęp: 15.08.2015].
- [4] Graf S., Kinshuk: Considering learning styles in learning managements systems: investigation the bahaviour of students in an online course. In: *Proc. of the 1st IEEE Int. Workshop on Semantic Media Adaptation and Personalization*, Athens 2006.
- [5] Kotarska-Lewandowska B.: Programy komputerowe a style uczenia się, XIV Konferencja Diagnostyki Edukacyjnej, Opole, 2008.
- [6] Larose D.T.: *Metody i modele eksploracji danych*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2008.
- [7] Lee M. : Profiling students adaptation styles in web-based learning, *Comput. Educ.* 36, 2003, p. 121-132.
- [8] Morzy T.: *Eksploracja danych: metody i algorytmy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [9] *Popularna Encyklopedia Powszechna*, Wydawnictwo FOGRA, 1994-1998
- [10] Taraszkiewicz M., *Nowa szkoła... wspieranie kariery ucznia*, WSiP, Warszawa 1997, s. 20.
- [11] Zakrzewska D.: *Eksploracja danych w modelowaniu użytkowników edukacyjnych i systemów internetowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2012.
- [12] Zakrzewska D.: *Cluster Analysis for Users’s Modeling in Intelligent E-Learning Systems*, Springer Heidelberg 2008, s. 209-214.
- [13] Oszust M.: *Rozprawa doktorska – Zastosowanie grupowania szeregów czasowych do rozpoznawania wypowiedzi w języku migowym na podstawie sekwencji wizyjnych*, Kraków 2013, s. 35-36.

- [14] Walesiak M., Dudek A.: Symulacyjna optymalizacja wyboru procedury klasyfikacyjnej dla danego typu danych – charakterystyka problemu, Zeszyty naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, 2006.

## **APPLICATION DATA MINING METHODS TO SUPPORT THE PREPARATION OF TEACHING**

### **S u m m a r y**

Data mining provides valuable knowledge hidden in large data sets. It allows to explore depending invisible to the naked eye. It has been used in education while preparation educational offer.

The article shows the application of data mining algorithms in the preparation of the educational process. In the considered range, data mining is used to transform raw data into knowledge, which allows to know the students' preferences. It has been focused on discovering groups of students and the development of models for the assessment of their learning styles. It has been applied unsupervised classification during process build groups. Groups have been created taking into account the preferences of students in science. It has been allowed get the groups consisting of students with similar learning styles. To verify the accuracy of the classification has been used indexes validation that allowed you to select the most efficient distribution of students. The study was conducted on data collected among students of Rzeszow University of Technology based on a survey questionnaire containing the ILS. Obtained during the studies results allowed to determine what materials teaching should be prepared to be tailored to the preferences of different groups of students. Understanding the learning styles of students allows teachers to better understand the preferences of students and the students to tailor materials to their own learning style, making it easier and faster to acquire knowledge.

**Keywords:** data mining, ILS, learning styles, classification, k-means, EM, knowledge discovery, teaching process

DOI: 10.7862/re.2016.3

*Tekst złożono w redakcji:* styczeń 2016

*Przyjęto do druku:* marzec 2016

Mirosław SOBASZEK<sup>1</sup>  
Michał MARKIEWICZ<sup>2</sup>

## SYSTEM DO POMIARU PRĘDKOŚCI REGATOWEJ ŁODZI ŻAGLOWEJ

Współczesne żaglowe łodzie regatowe, ze względu na trwający wiele lat postęp techniczny w zakresie budowy jachtów oraz postępującą świadomość załogi w zakresie teorii żeglowania, wyposażone są w szereg mechanizmów służących do regulacji kształtu żagli, ich wzajemnego usytuowania i ustawienia względem kadłuba. Z uwagi na dużą ilość regulacji, które mogą mieć wpływ na prędkość łodzi płynącej określonym kursem do wiatru w pewnych warunkach wiatrowych, dobór optymalnych ustawień żagli staje się rzeczą skomplikowaną i czasochłonną. W związku z czym istnieje realna potrzeba stosowania systemu, który pozwoliłby na pomiar, archiwizację i prezentację w czasie rzeczywistym podstawowych parametrów ruchu łodzi żaglowej. Pozwoliłoby to na szybkie oszacowanie efektywności wprowadzonych zmian w ustawieniu żagli. Obecnie w sprzedaży komercyjnej brakuje rozwiązania za stosunkowo niską cenę, które mogłoby być wykorzystane do oceny parametrów nautycznych małych jachtów żaglowych. Celem artykułu jest zaprezentowanie działania systemu, który w przyszłości ma szansę spełnić te wymagania. Stworzone oprogramowanie umożliwia pomiar prędkości łodzi z użyciem odbiornika GSP oraz pomiar kierunku i prędkości wiatru z wykorzystaniem anemometru kierunkowego. Zebrane dane w module akwizycji, opartym o mikrokontroler, przesyłane są poprzez moduł Bluetooth do tabletu z systemem Android, gdzie na podstawie zebranych danych wykreślone są biegunowe wykresy prędkości łodzi żaglowej w funkcji kierunku i prędkości wiatru. Dzięki czemu możliwe staje się znalezienie optymalnego kąta żegluga oraz efektywnej prędkości jachtu w trakcie żeglowania na wiatr. Ponadto z wykorzystaniem rozmytej interpretowanej sieci Petriego możliwe jest sprawdzanie czy jacht płynie zgodnie z wyznaczonymi parametrami w aktualnie panujących warunkach. Prezentowane rozwiązanie znacząco zmniejsza nakład pracy konieczny do znalezienia optymalnego ustawienia jachtu.

**Słowa kluczowe:** system pomiarowy, jacht żaglowy, sieci Petriego

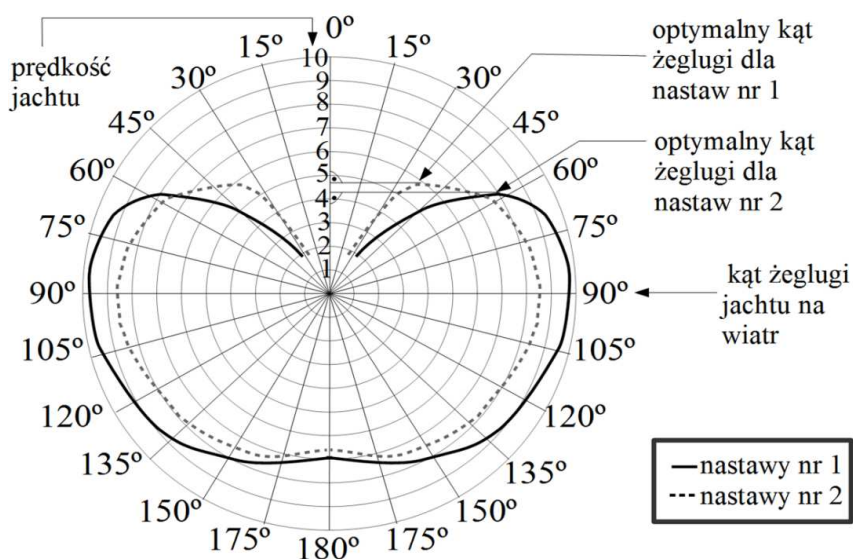
---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Mirosław Sobaszek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów, tel. (17) 86-51-279, email: somirek@prz.edu.pl.

<sup>2</sup> Michał Markiewicz, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów, tel. (17) 86-51-536, email: mmarkiewicz@kia.prz.edu.pl.

## 1. Wprowadzenie do tematyki badań

Jacht żaglowy porusza się na granicy dwóch ośrodków: powietrza i wody, wykorzystując do swojego ruchu ich względną różnicę prędkości. Do podróżowania na styku powietrza i wody wykorzystywane są „skrzydła” zanurzone w tych ośrodkach. Siły nośne powstające wskutek opływu żagla i płetwy mieczowej są wzajemnie tak ustawione, aby ich różnica napędzała jacht w pożądanym kierunku. Celem załogi jachtu regatowego jest jak najefektywniejsze wzajemne ustawienie elementów jachtu oraz dokonanie optymalnych regulacji żagli w danych warunkach wiatrowych. W celu wytworzenia siły nośnej na płetwie mieczowej lub żaglu potrzebny jest pewien kąt zaklinowania napływającego strumienia. Z tego względu jacht nie może płynąć prosto pod wiatr. Konieczne jest tzw. halsowanie, w czasie którego jacht płynie pod pewnym kątem do wiatru, kierując się na prawo lub na lewo od wiatru. Jacht osiąga cel ustawiony pod wiatr poprzez przeplnięcie równej drogi na prawym i lewym halsie. W żegludze pod wiatr prędkość jachtu nie jest jedynym wyznacznikiem jakości ustawień jachtu. Równie ważnym czynnikiem jest kąt pod jakim łódź płynie na prawym lub lewym halsie. Na rys.1 przedstawiono porównanie dwóch ustawień żagli.



Rys.1. Przykładowe wykresy prędkości jachtu w funkcji kąta żeglugi na wiatr dla dwóch ustawień żagli

Fig. 1. Exemplary sailboat speed curves in function of boat angle to the true wind for the two sails settings



Można zauważyć, że ustawienie nr 2 pomimo mniejszych osiąganych prędkości jest lepsze do żeglugi na wiatr, gdyż pozwala płynąć pod mniejszym kątem, dając w efekcie większą składową wektora prędkości w kierunku pod wiatr [1]. Celem prezentowanego systemu jest zbieranie danych pomiarowych i prezentacja wykresów w sposób ułatwiający analizę efektów różnego ustawienia żagli.

## **2. Omówienie istniejących rozwiązań dotyczących rozważanego problemu.**

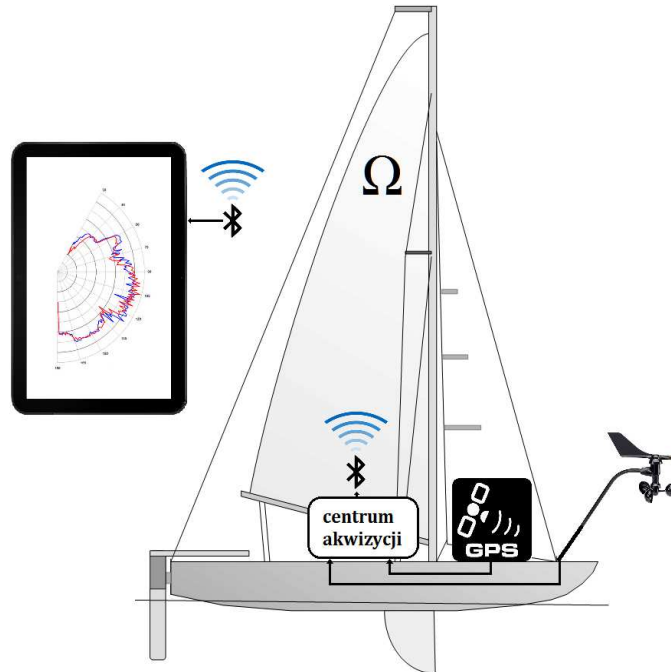
Istnieją nieliczne publikacje naukowe opisujące systemy pomiarowe służące do analizy efektywności i porównania różnych ustawień regatowego jachtu żaglowego. Można zauważyć, że opisane rozwiązania dzielą się na dwa typy – amatorskie oraz profesjonalne. Rozwiązania profesjonalne takie jak opisane w zgłoszeniu patentowym Stevena A. Gedeona [2], są wynikiem pracy dużych zespołów zaangażowanych w prestiżowe regaty np. America's Cup. Systemy te wykorzystują bardzo dużą ilość rozmaitych czujników (do pomiarów naprężeń, kierunków i prędkości przepływów oraz orientacji jachtu w przestrzeni), których poprawne wykorzystanie wymaga szerokiej wiedzy z wielu dziedzin techniki pomiarowej oraz jest bardzo kosztowne. Systemy amatorskie podobne do rozwiązania Alexandre'a Bergeron'a [3] korzystają z małej liczby czujników, co czyni je praktycznymi w zastosowaniu w małych jachtach regatowych. Układy akwizycji danych tych rozwiązań bazują na połączeniu różnych gotowych podsystemów elektronicznych, których działanie nie jest optymalne w tym zastosowaniu. Wynikiem takiej budowy tych urządzeń są błędy pomiarowe, różnice przesunięcia fazowego dla poszczególnych sygnałów pomiarowych na wyjściu systemu oraz brak lub zbytne uproszczenie oprogramowania do analizy pomiarów – z tego powodu systemy te mają bardzo ograniczone możliwości.

## **3. Opis systemu użytego w badaniach**

System pomiarowy pokazano na rys. 2. Składa się on z centrum akwizycji, które pobiera dane o prędkości i kierunku wiatru pozornego pochodzących z anemometru zainstalowanego na dziobie jachtu oraz dane o rzeczywistej prędkości łodzi z odbiornika GPS. Kierunek i prędkość wiatru rzeczywistego są obliczane na podstawie różnicy wektorów prędkości wiatru pozornego oraz prędkości łodzi.

Na podstawie danych z czujników, które układ akwizycji przesyła do tabletu za pośrednictwem interfejsu Bluetooth, oprogramowanie oblicza rzeczywisty kąt i prędkość wiatru, a następnie archiwizuje zebrane dane.

Zgromadzone informacje pozwalają na stworzenie wykresów prędkości łodzi w funkcji kąta żeglugi na wiatr. Ponadto system pozwala porównać bieżące dane pomiarowe z zapisanymi wcześniej charakterystykami i informują załogę o tym czy jacht płynie optymalnym kursem do wiatru.



Rys. 2. Schemat poglądowy systemu pomiarowego

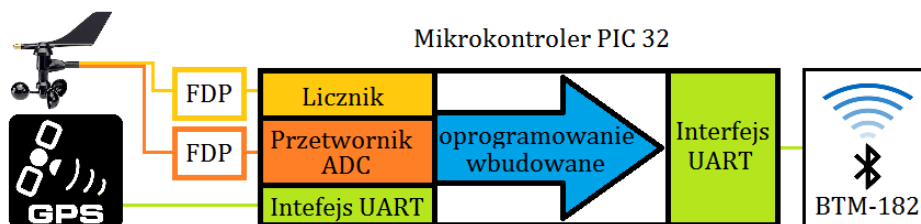
Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system

### 3.1. Moduł akwizycji danych

Schemat blokowy modułu akwizycji danych znajduje się na rys. 3. Do pomiarów prędkości wiatru użyto anemometru czasowego Vantage Pro firmy Davis, który z wykorzystaniem kontraktanu zamienia prędkość obrotową głowicy czasowej na częstotliwość mierzoną następnie w układzie mikrokontrolera. Przyrząd Vantage Pro dostarcza również informacje o kierunku wiatru, zamieniając za pomocą potencjometru położenie wskaźnika kierunku wiatru na napięcie, które następnie jest poddane filtracji i przetwarzaniu analogowo-cyfrowemu w układzie ADC mikrokontrolera.

Dane o rzeczywistej prędkości łodzi żaglowej pobierane są za pośrednictwem interfejsu UART z układu odbiornika GPS zintegrowanego z

antena – ORG1418. Zebrane dane pomiarowe przesyłane są następnie magistralą szeregową do układu transceivera Bluetooth BTM-182.



Rys. 3. Schemat blokowy modułu akwizycji danych

Fig. 3. The block diagram of the data acquisition module

### 3.2. Opis technologii systemu analizującego dane pomiarowe

System analizujący dane przychodzące z przyrządów pomiarowych jest uruchamiany na tablecie firmy Sony Xperia Z3 z użyciem systemu Android 4.4.4. Aplikacja napisana jest za pomocą środowiska Android Studio przeznaczonego do tworzenia oprogramowania dla platformy Android z wykorzystaniem języka Java. Początkowo uruchamianie i testowanie tworzonej aplikacji było przeprowadzane z użyciem symulatora udostępnionego przez środowisko Android Studio. W kolejnej fazie rozwoju projektu testy przeprowadzono bezpośrednio na tablecie, w którym system miał docelowo działać. Wszystkie dane otrzymane z interfejsu Bluetooth przechowywane są w bazie danych SQLite, która jest domyślnie dostępna dla aplikacji systemu Android i nie wymaga instalowania dodatkowego oprogramowania.

### 3.3. Opis systemu analizującego dane pomiarowe

Wygląd systemu do rejestracji, analizy i monitorowania danych znajduje się na rys. 4. Składa się on z następujących elementów (oznaczonych na rysunku):

A: nazwa systemu oraz informacja o tym czy urządzenie jest połączone z czujnikami;

B: główne menu programu;

C: sekcja, w której wyświetlana jest krótka informacja opisująca wybraną opcję z menu głównego, w przypadku naciśnięcia przycisku *SHOW LOG* wyświetlane są w tej części interfejsu logi systemowe;

D: część interfejsu, w której są realizowane akcje wybrane z menu.

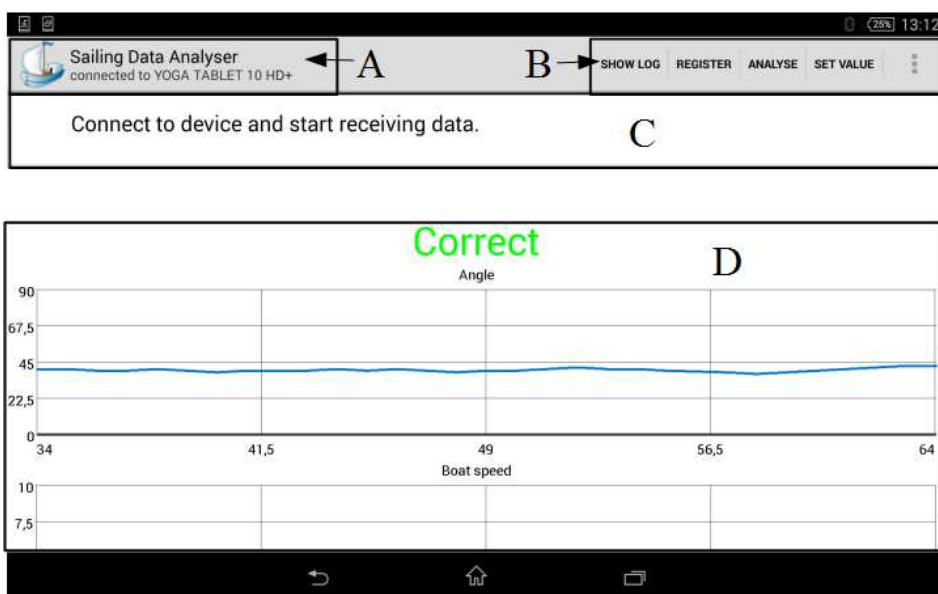
Jak pokazuje rys. 4 menu główne składa się z następujących opcji (pominięto opcję *SHOW LOG*, która została omówiona powyżej):

a) *REGISTER*: służy do nawiązania komunikacji z przyrządami pomiarowymi oraz do rejestracji danych, które są zapisywane w bazie danych oraz wyświetlane na bieżąco na wykresach (ostatnie 30 punktów dla każdej

mierzonej wielkości: kurs jachtu względem wiatru, prędkość jachtu, prędkość wiatru). Jeśli wcześniej ustawiono zadany optymalny kąt żeglugi na wiatr, to w tej akcji będzie sprawdzane, czy jacht płynie zadaniem kursem, w sekcji *D* pojawi się wówczas informacja o poprawności kursu;

b) *ANALYSE*: po wybraniu tej opcji możliwe jest wyświetlanie danych pomiarowych zarejestrowanych w akcji *REGISTER* oraz znalezienie dla nich optymalnego kąta żeglugi jachtu na wiatr. Ze względu na dużą ilość danych pomiarowych, wyświetlenie wszystkich punktów naraz może spowolnić pracę aplikacji, dlatego istnieje możliwość ich filtrowania ze względu na datę zapisu oraz wg prędkości wiatru dla jakiej były zmierzone;

c) *SET VALUE*: służy do ustawienia wartości zadanej kąta żeglugi na wiatr, z którym będą porównywane bieżące dane pomiarowe, otrzymywane w akcji *REGISTER*.



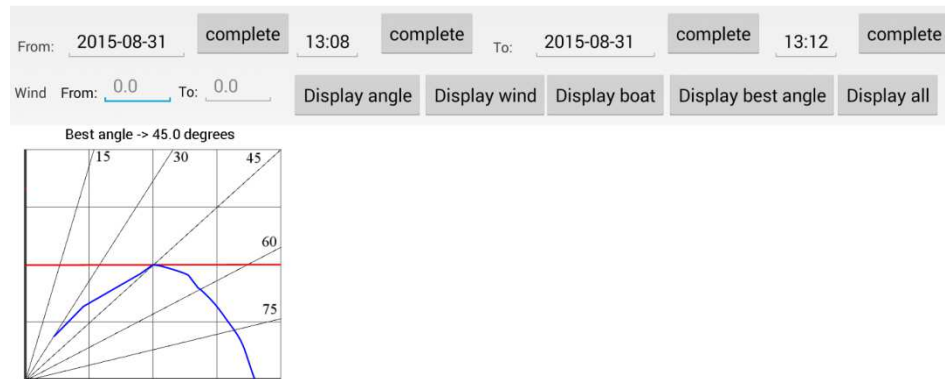
Rys. 4. Widok aplikacji po wybraniu opcji rejestracji danych (*REGISTER*) z głównego menu

Fig. 4. View of the application after option to register data (*REGISTER*) was clicked

### 3.4. Obliczanie optymalnego kąta żeglugi jachtu na wiatr

Aplikacja do analizy danych pomiarowych jachtu umożliwia sporządzenie wykresów: prędkości jachtu, kąta żeglugi jachtu względem wiatru, prędkości wiatru oraz wykresu biegunowego wyrażającego zależność prędkości jachtu od kąta żeglugi na wiatr.

Na rys. 5 pokazano przykładowy wykres biegunowy narysowany w omawianej aplikacji. Wykres ten można uzyskać dla zadanych parametrów poprzez określenie zakresu czasu, podczas którego pomiary były dokonywane oraz zakresu wiatru, który ma być analizowany, tak aby możliwe było uzyskanie optymalnego kąta żeglugi dla wybranych warunków wiatrowych. Na rys. 5 został pokazany wykres biegunowy prędkości jachtu z zaznaczonym optymalnym kursem jachtu względem wiatru wyznaczonym przez oprogramowanie.



Rys. 5. Widok aplikacji po wyszukaniu optymalnego kąta żeglugi w akcji *ANALYSE*

Fig. 5. View of the application after optimal angle was found in action *ANALYSE*

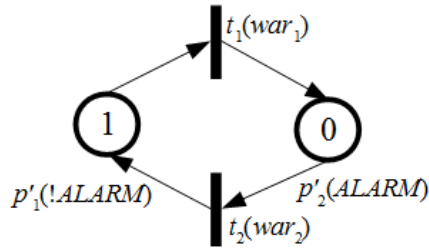
### 3.5. Diagnozowanie optymalnego kąta żeglugi: sieci Petriego

Aplikacja do analizy danych pomiarowych jachtu umożliwia diagnozowanie optymalnego kąta żeglugi w trakcie rejestracji danych. Dzięki temu sternik na bieżąco może sprawdzić czy płynie optymalnym kursem jachtu względem wiatru. W celu skorzystania z tej funkcji należy wybrać opcję *SET VALUE* i ustawić odpowiednie parametry:

- wartość zadanego kursu jachtu względem wiatru ( $A_z$ );
- wartość tolerancji o jaką może się różnić bieżący kurs jachtu od  $A_z$  ( $\Delta a$ );
- liczba kolejnych niepoprawnych pomiarów ( $L_n$ ), po których sternik zostaje poinformowany o błędnym kursie;
- liczba kolejnych poprawnych pomiarów, po których sternik zostaje poinformowany o tym, że płynie zgodnie z zadanym kursem ( $L_p$ ).

Na podstawie parametrów  $A_z$ ,  $\Delta a$ ,  $L_n$ ,  $L_p$  aplikacja informuje na bieżąco załogę czy jacht płynie zadanym kursem względem wiatru. Do monitorowania optymalnego kursu wykorzystywana jest sieć Petriego, pokazana na rys. 6. Jest to sieć rozmyta interpretowana zaproponowana przez L. Gniewka w [4]. W obecnej postaci systemu wystarczyłoby użyć nierozmytą interpretowaną sieć

Petriego, ale wybór sieci rozmytej jest podyktowany spodziewaną przyszłą rozbudową systemu. Sieć ma dwa miejsca typu  $p'$ . Gdy znacznik jest w  $p'_1$  to oznacza to, że jacht płynie poprawnie. Jeśli znacznik jest w  $p'_2$  to oznacza to, że wyświetlany jest błąd.



Rys. 6. Sieć Petriego użyta do wykrywania czy jacht płynie optymalnym kątem do wiatru

Fig. 6. Petri Net used to detect if yacht sail optimal angle to wind

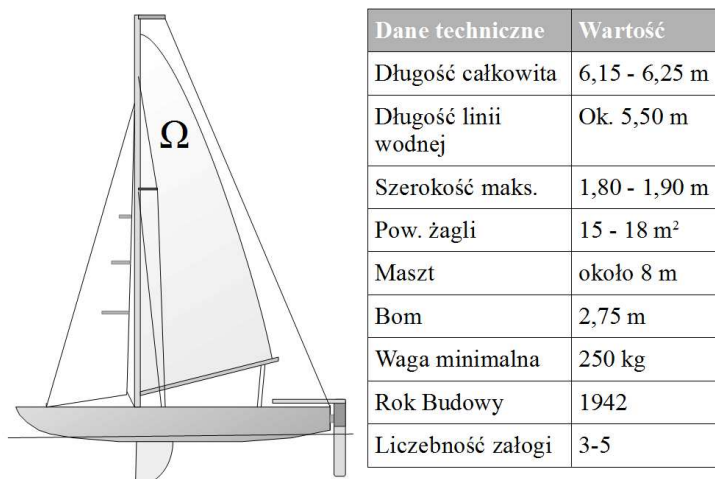
Zgodnie z rys. 6 do uaktywnienia tranzycji  $t_1$  jest wymagane spełnienie warunku  $war_1$ . Warunek ten jest sformułowany w następujący sposób: jeśli w miejscu  $p'_1$  znajduje się znacznik i  $L_n$  kolejnych pomiarów jest niepoprawnych czyli:  $A_z + \Delta a < a_i$  lub  $A_z - \Delta a > a_i$ , gdzie  $i = 1, 2 \dots L_n$ , to warunek  $war_1$  jest spełniony i tranzycja  $t_1$  staje się aktywna. Analogicznie został sformułowany warunek  $war_2$ : jeśli w miejscu  $p'_2$  znajduje się znacznik i jeśli  $L_p$  kolejnych pomiarów jest poprawnych czyli  $A_z + \Delta a > a_i > A_z - \Delta a$ , gdzie  $i = 1, 2 \dots L_p$ , to  $war_2$  jest spełniony i tranzycja  $t_2$  staje się aktywna.

### 3.6. Pływające laboratorium

Do badań opisanych w artykule został wykorzystany jacht klasy Omega z zainstalowanym na pokładzie systemem pomiarowym. Wszystkie elementy systemu wraz z tabletem posiadają stopień ochrony IP65. Ta cecha jest szczególnie ważna, ponieważ istnieje ryzyko zamoczenia sprzętu w wyniku opadów deszczu, wysokiej fali na akwenu żegludowym lub wywrócenia się jachtu.

Badany jacht należy do najbardziej popularnej klasy łodzi żaglowych w Polsce. Największa ilość jednostek tej klasy startujących w zawodach, organizowanych na terenie całej Polski, czyni te jachty idealnymi obiektami badawczymi, umożliwiając przeprowadzenie wielu eksperymentów porównawczych ułatwiających weryfikację zdobytej wiedzy.

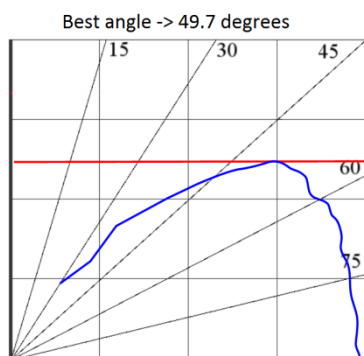
Podstawowe dane techniczne jachtu klasy Omega zostały przedstawione na rys. 7 na podstawie [5, 6].



Rys. 7. Rysunek poglądowy jachtu żaglowego Omega wraz z danymi technicznymi z lewej strony  
 Fig. 7. Explanatory figure sailing yacht Omega with technical data in the left

#### 4. Wyników pomiarów

Uzyskane w trakcie sesji pomiarowych dane zostały zaprezentowane na rysunku 8. Ze względu na porywisty wiatr występujący w czasie zbierania danych, pomimo zastosowania filtra uśredniającego ze średnią kroczącą, oprogramowanie z trudnością identyfikowało obszary o niezmiennych wartościach prędkości i kąta wiatru przy jednocześnie stałej prędkości łodzi. Niewielka liczba nieodrzuconych punktów pomiarowych jest przyczyną nierównomiernego przebiegu krzywej prędkości jachtu w funkcji kąta żeglugi na wiatr.



Rys. 8. Wykres uzyskany po przeprowadzeniu badań

Fig. 8. Plot obtained after tests

Wyniki badań pozwalają sądzić, że przy bardziej stałych warunkach wiatrowych możliwe będzie sporządzenie porównawczych wykresów dla różnych ustawień żagli. Pozwoli to poznać wpływ na prędkość i kierunek jachtu do wiatru w zależności od stosowanych konfiguracji i warunków atmosferycznych. Dodatkowo w trakcie żeglugi możliwe było zaobserwowanie jak pewne elementy pracy załogi (rozmieszczenie wzdłużne i poprzeczne poszczególnych jej członków) wpływały na prędkość jachtu żaglowego.

## 5. Wnioski

Zbudowany system pozwala na zbieranie, archiwizację i analizę danych pomiarowych, umożliwiając ocenę parametrów nautycznych jachtu. Napotkane trudności w trakcie realizacji projektu badawczego wskazują na konieczność przeprowadzenia dalszych pomiarów w celu uzyskania większej liczby wyników dla stałych prędkości i kierunku wiatru oraz skłaniają do poszukiwania efektywniejszego algorytmu filtracji danych pomiarowych. Planuje się wyposażenie systemu w dodatkowy anemometr zlokalizowany na rufie jachtu, tak aby umożliwić dokonywanie precyzyjnych pomiarów prędkości i kierunku wiatru pozornego na kursach z wiatrem. Dodatkowo system warto byłoby wzbogacić w układ inklinometru pozwalający na monitorowanie przechylenia jachtu oraz oceny zafalowania akwenu.

## Literatura

- [1] Marchaj Cz.: Teoria żeglowania. Aerodynamika żagla, Alma-Press Sp. z o.o, Warszawa 2000.
- [2] Gedeon S.: Sailboat and crew performance optimization system, US PATENT 6,308,649 B1.
- [3] Bergeron A., Baddour N.: Development of a dynamic variable measurement system for use in wind powered yachts, Proceedings of the 23rd CANCEM.
- [4] Gniewek L.: Sequential control algorithm in the form of fuzzy interpreted Petri net, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, VOL. 43, NO. 2, MARCH 2013, s. 451-459.
- [5] Radwaniecki W.: Historia Klasy Omega, <http://klasaomega.pl/stowarzyszenie/historia/historia-klasy/>, otworzono: 11.08.2015.
- [6] Przepisy Klasy Omega Sport, <http://klasaomega.pl/wp-content/uploads/2013/03/SPORT-2013-2017.pdf>, otworzono: 11.08.2015.



## SYSTEM FOR MEASURING SPEED OF RACING SAILBOAT

### Summary

Contemporary racing sailboats because of many years of technical progress in the construction of yachts and advancing knowledge of the crew in the theory of sailing, are equipped with a set of mechanisms to control the shape of sails, their mutual positioning and their positioning relative with the hull. Thanks to the large number of regulations that may have an effect on boat speed sailing upwind under certain wind conditions, selection of the optimal settings of sails becomes complicated and time-consuming. Thus, there exists a real need to use system that allow the measurement, archiving and presentations in real time the basic parameters of a moving sailboat. This would allow find a quick estimation of effectiveness of changes made to the sails settings. Currently commercially is lack of a relatively cheap solutions, which could be used to evaluate the nautical parameters of small yachts. The aim of the article is to present the system, which in future could meet these requirements. This system measures the speed of the sailboat using a GPS receiver, as well as wind speed and direction using a directional anemometer. The data collected through acquisition module based on microcontroller is sent via Bluetooth to the Android tablet that on the basis of receiving data allows to draw polar graphs of sailboat speed as a function of wind speed and direction. Hence, it becomes possible to find the optimal angle and the effective speed of the sailboat during sailing upwind. Moreover, software allows to check if yacht sails accordance to designated parameters thanks to the use of Petri nets. This solution significantly reduces the effort required to find the optimal sailboat settings.

**Keywords:** measurement system, sailboat, Petri nets

DOI: 10.7862/re.2016.4

*Tekst złożono w redakcji:* styczeń 2016

*Przyjęto do druku:* marzec 2016

Dawid WARCHOŁ<sup>1</sup>

## PORÓWNANIE I ŁĄCZENIE CECH DESKRYPTORÓW CHMUR PUNKTÓW W ROZPOZNAWANIU STATYCZNYCH UKŁADÓW DŁONI

W pracy omówiono metodę rozpoznawania statycznych układów dłoni przy użyciu trzech deskryptorów chmur punktów: Viewpoint Feature Histogram (VFH), Global Radius-Based Surface Descriptor (GRSD) oraz Ensemble of Shape Functions (ESF). Deskryptory te opisują chmury punktów wykorzystując siatkę prostopadłościennych, wolumetrycznych elementów (ang. voxel grid), wektory normalne wyznaczone dla powierzchni chmury, rozkłady odległości punktów od ich sąsiadów oraz promienie sfer wpisanych we fragmenty powierzchni. Przeprowadzono testy walidacji krzyżowej uzyskując w ten sposób zestawienie wyników skuteczności klasyfikacji dla pojedynczych cech każdego deskryptora, łączonych cech tego samego i różnych deskryptorów. Testy przeprowadzono na zbiorze danych zawierającym 1000 map głębi: 10 różnych układów dłoni wykonanych 10 razy przez 10 osób. Przed przystąpieniem do procesu ekstrakcji cech każda chmura punktów jest wstępnie przetwarzana, włączając w to: segmentację (w celu oddzielenia dłoni od pozostałych fragmentów chmury), rotację względem środka dłoni oraz najdłuższego z wysuniętych palców (w celu uniezależnienia metody od obrotów dłoni wokół osi prostopadłej do obiektywu kamery) oraz redukcję punktów (w celu przyspieszenia obliczeń). Zestawienie wyników testów uzupełniono o dodatkową informację – rozmiar wektora cech wykorzystanego przy klasyfikacji, co pozwala odnaleźć kombinację cech będącą punktem kompromisu pomiędzy skutecznością klasyfikacji a ilością wymiarów danych.

**Słowa kluczowe:** deskryptory chmur punktów, Histogram Cech Zależnych od Punktu Widzenia, Globalny Deskryptor Powierzchni Bazujący na Promieniach Sfer, Zestaw Funkcji Kształtu

### 1. Wstęp

W artykule tym omówiono podejście do rozpoznawania postur dłoni (nazywanych też statycznymi gestami) w oparciu o trójwymiarowe dane głębi w formie chmur punktów.

---

<sup>1</sup> Dawid Warchoł, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-021 Rzeszów, tel. 796 795 080, email: dawwar@prz.edu.pl.

Najbardziej popularnym i niedrogim urządzeniem do pozyskiwania danych głębi jest sensor Microsoft Kinect<sup>TM</sup>, wprowadzony w listopadzie 2010 roku jako kontroler gier komputerowych. Warty uwagi są również kamery typu time-of-flight, wcześniej uważane za drogie, specjalistyczne urządzenia, które obecnie stają się coraz bardziej przystępne dla rynku masowego. Rosnąca popularność tych urządzeń spowodowała zainteresowanie badaczy tematyką rozpoznawania gestów wykonywanych dłonią z wykorzystaniem kamer głębi. Najczęściej jednak dane 3D są używane jedynie do segmentacji lub jako informacja pomocnicza zawarta w wektorach cech klasyfikowanych obiektów (np. [11], [12], [19], [21]). Kombinacja danych kolorowych oraz głębi została zastosowana przez [20] w celu klasyfikacji postur dłoni wykorzystując transformację Average Neighborhood Margin Maximization aproksymowaną Haarletami, czyli cechami opartymi na falkach Haara. Odmienne podejście do rozpoznawania układów dłoni bazując na danych głębi zostało przedstawione w [6]. Informacja pozyskana z kamery Kinect<sup>TM</sup> została użyta w celu wygenerowania szkieletów przez algorytm Mean Shift Local Mode Finding. Następnie zastosowano metodę dopasowania szkieletów oraz losowe lasy decyzyjne aby dokonać klasyfikacji pikseli głębi na fragmenty dłoni. Znaczący wpływ danych głębi na cechy obiektów wykorzystywane w klasyfikacji można zaobserwować w pracy [3]. Deskryptor opracowany przez autorów zawiera następujące zestawy cech: (i) odległości czubków palców od środka dłoni, (ii) odległości czubków palców od płaszczyzny aproksymującej powierzchnię dłoni, (iii) krzywizna konturów dłoni oraz (iv) kształt środkowej części dłoni (bez palców).

W niniejszym artykule proponujemy wykorzystanie informacji 3D w postaci deskryptorów chmur do klasyfikacji postur dłoni. Rozpatrujemy trzy deskryptory: (i) Viewpoint Feature Histogram (VFH), (ii) Global Radius-Based Surface Descriptor (GRSD), (iii) Ensemble of Shape Functions (ESF). Zbadana zostanie skuteczność klasyfikacji dla pojedynczych cech każdego deskryptora, łączonych cech tego samego i różnych deskryptorów. Rozmiar wektora cech wykorzystanego przy klasyfikacji w każdym z testowanych przypadków pozwoli odnaleźć kombinację cech będącą punktem kompromisu pomiędzy skutecznością klasyfikacji a ilością wymiarów danych.

Deskryptor VFH był przedmiotem naszych dotychczasowych badań, natomiast pozostałe 2 deskryptory nie były wcześniej wykorzystywane do rozpoznawania gestów wykonywanych dłonią. W [4] zaproponowano modyfikację sposobu liczenia VFH w celu rozpoznawania gestów dynamicznych, którą następnie wykorzystano do rozpoznawania statycznych postur dłoni [5]. Polegała ona na dzieleniu obserwowanej sceny na mniejsze prostopadłościowe komórki i wyznaczaniu cech deskryptora dla każdej z nich (niezależnie od pozostałych). Metoda ta zwiększyła dystynktywność VFH, szczególnie w przypadku obiektów o subtelnych różnicach kształtu, co zostało potwierdzone poprzez eksperymenty, które wykazały znacznie większą skuteczność rozpoznawania w przypadku dzie-

lonej sceny. Z tego powodu w niniejszej pracy wykorzystano metodę dzielenia sceny do obliczania cech każdego z trzech deskryptorów.

## 2. Deskryptory chmur punktów

W rozdziale tym przedstawiono teoretyczny opis wszystkich trzech deskryptorów chmur punktów wykorzystywanych w niniejszej pracy. W przeprowadzonych eksperymentach (opisanych w rozdziale 3) wykorzystaliśmy bibliotekę PCL do przetwarzania chmur punktów oraz obliczania wartości deskryptorów.

### 2.1. Viewpoint Feature Histogram

Viewpoint Feature Histogram (VFH, pol. Histogram Cech Zależnych od Punktu Widzenia) po raz pierwszy został przedstawiony w [15]. Jest to globalny deskryptor chmury punktów, czyli struktury reprezentującej wielowymiarowy zbiór punktów w układzie współrzędnych [16]. Horyzontalna oś  $x$  układu jest skierowana w lewo, wertykalna oś  $y$  jest skierowana ku górze, natomiast oś  $z$  pokrywa się z osią optyczną kamery i jest zwrócona w stronę obserwowanego obiektu. VFH składa się z dwóch komponentów: (i) kształtu powierzchni, który opisuje geometryczne właściwości obiektu oraz (ii) kierunku patrzenia. Deskryptor ten jest w stanie wykryć subtelne zmiany geometrii obiektów nawet w przypadku powierzchni nieteksturowanych, co zostało dowiedzione eksperymentalnie [15].

Komponent kształtu powierzchni składa się z cech  $\theta$ ,  $\cos(\alpha)$ ,  $\cos(\Phi)$  i  $d$  mierzonych między środkiem ciężkości chmury  $p_c$  i każdym punktem  $p_i$  do niej należącym (patrz rys. 1).  $n_c$  jest wektorem z punktem przyłożenia  $p_c$ , którego współrzędne są równe średniej wszystkich wektorów normalnych do powierzchni, natomiast  $n_i$  reprezentuje normalne oszacowane w punkcie  $p_i$ . Kąty  $\theta$  i  $\alpha$  można opisać jako kątami odchylenia (ang. yaw) oraz pochylenia (ang. pan) pomiędzy dwoma wektorami, natomiast  $d$  określa odległość euklidesową pomiędzy  $p_i$  i  $p_c$ . Wektory i kąty przedstawione na rysunku 1 zdefiniowane są następująco:

$$u = n_c \quad (1)$$

$$v = \frac{p_i - p_c}{d} \times u \quad (2)$$

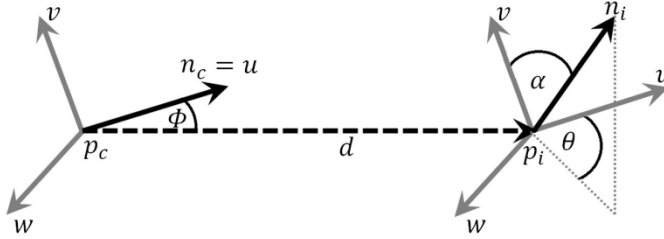
$$w = u \times v \quad (3)$$

$$\cos(\alpha) = v \cdot n_i \quad (4)$$

$$\cos(\phi) = u \cdot \frac{p_i - p_c}{d} \quad (5)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{w \cdot n_i}{u \cdot n_i}\right) \quad (6)$$

gdzie kropka oznacza iloczyn skalarny, natomiast krzyżyk – iloczyn wektorowy.



Rys. 1. Cechy komponentu kształtu powierzchni VFH

Fig. 1. Features of the surface shape component of the VFH

Komponent kierunku patrzenia zawiera histogram kątów pomiędzy linią będącą kierunkiem patrzenia (pokrywającą się z osią  $z$ ) a każdym wektorem normalnym. Metoda obliczania VFH ma jeden parametr  $nn_{vfh}$  oznaczający liczbę punktów należących do lokalnego sąsiedztwa, który jest wykorzystywany do oszacowania wektorów normalnych. Histogramy VFH zawierają po 45 przedziałów dla każdej cechy komponentu kształtu powierzchni oraz 128 dla komponentu kierunku patrzenia (w sumie 308 przedziałów). Bardziej szczegółowy opis obliczania VFH jest przedstawiony w [18], [14] (deskryptory PFH oraz FPFH) oraz [15].

## 2.2. Global Radius-Based Surface Descriptor

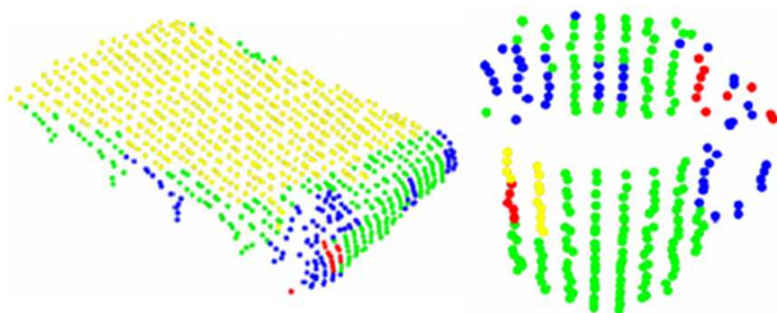
Deskryptor Global Radius-based Surface Descriptor (GRSD, pol. Globalny Deskryptor Powierzchni Bazujący na Promieniach Sfer) po raz pierwszy pojawił się w [10]. Jest on globalną wersją deskryptora Radius-Based Surface Descriptor (RSD, pol. Deskryptor Powierzchni Bazujący na Promieniach Sfer) powstałą z połączenia lokalnego RSD, deskryptora Global Fast Point Feature Histogram (GFPFH, pol. Globalny Szybki Histogram Cech Punktów) [17] oraz metody 2D Speeded Up Robust Features (SURF) [1]. GRSD opisuje radialne relacje punktów z ich sąsiedztwem. Aby zrozumieć jego działanie, należy najpierw przedstawić lokalny deskryptor RSD, który został opisany w pracach [8], [9].

RSD jest tworzony w następujący sposób. Dla każdej pary punktu i jego sąsiada algorytm oblicza odległości między nimi oraz różnicę pomiędzy ich wek-

torami normalnymi. Następnie wyznaczana jest sfera, na której powierzchni leżą oba punkty. Do określenia położenia i promienia sfery wykorzystywana jest również informacja o wektorach normalnych punktów: wektory te muszą być prostopadłe do powierzchni sfery. Pominięcie informacji o normalnych spowodowałoby istnienie nieskończonej ilości sfer dla każdej pary punktów. Na koniec dla danego punktu wybrane zostają dwie sfery: największa i najmniejsza, których promienie tworzą deskryptor tego punktu.

Można zaobserwować, że w przypadku, gdy oba punkty leżą na zakrzywionej ścianie walca, promień wygenerowanej sfery będzie mniej więcej równy promieniowi walca. Jeśli natomiast punkty leżą na jednej płaszczyźnie, promień sfery będzie nieskończenie długi. Algorytm przyjmuje 2 parametry:  $rnp_{grsd}$  – promień lokalnego sąsiedztwa, który jest wykorzystywany do oszacowania wektorów normalnych oraz  $rnn_{grsd}$  – promień, w obrębie którego wybierani są sąsiedzi punktów.

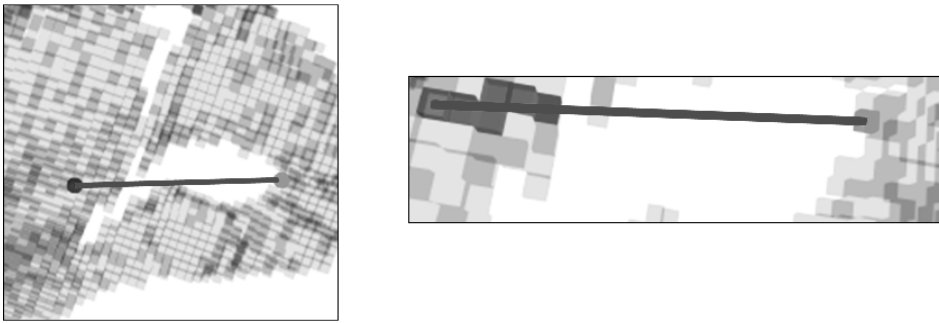
Aby wyznaczyć globalną wersję deskryptora RSD, czyli GRSD, należy najpierw przeprowadzić kategoryzację powierzchni. Obliczone w każdym punkcie deskryptory RSD są wprowadzane jako wejście algorytmu Conditional Random Field (CRF), który przypisuje punktowi jedną z pięciu etykiet kategorii: płaszczyzna, walec, ostra krawędź (lub szum), obrzeże, sfera. Mamy więc na tym etapie chmurę z każdym punktem sklasyfikowanym w zależności od typu obiektu lub pewnego regionu, do którego punkt należy (rys. 2).



Rys. 2. Kategoryzacja powierzchni przeprowadzona w każdym punkcie dwóch obiektów; różne kolory reprezentują następujące kategorie: płaszczyzna - żółty, walec - zielony, ostra krawędź lub szum - czerwony, obrzeże (np. granica przejścia pomiędzy powierzchniami) - niebieski, sfera (nie została sklasyfikowana w przedstawionych chmurach punktów); na podstawie [10]

Fig. 2. Surface categorization performed for every point in the two objects; different colors represent the following categories: plane - yellow, cylinder - green, sharp edge or noise - red, rim (boundary, transition between surfaces) - blue, sphere (not classified in the presented point clouds); based on [10]

Kolejnym krokiem jest utworzenie tzw. drzewa ósemkowego (ang. octree), czyli hierarchicznej struktury przechowywania wokseli (trójwymiarowego odpowiednika pikseli o sześciennym kształcie) ułatwiającej ich przeszukiwanie, kompresję oraz próbkowanie chmury punktów. Dla każdego utworzonego woksela wyznaczamy kategorię powierzchni, którą z największym prawdopodobieństwem reprezentuje. Jest to kategoria, do której należących punktów jest najwięcej wewnątrz danego woksela. Następnie, dla każdej pary wokseli w całym octree, przeprowadza się linię łączącą ich środki (rys. 3). Kolejnym krokiem jest znalezienie wokseli, przez które przechodzi wyznaczona linia i sprawdzenie, czy znajduje się w nich przynajmniej jeden punkt. Na tej podstawie tworzony jest wykres, który każdemu wokselowi przypisuje numer jego kategorii lub 0, jeśli woksel jest pusty.



Rys. 3. Obliczanie GRSD na siatce wokseli; rysunek przedstawia przykładową linię łączącą 2 woksela utworzone na podstawie chmury punktów; na podstawie [17]

Fig. 3. The calculation of the GRSD descriptor on a voxel grid; the figure presents an example line connecting 2 woksels created based on a point cloud; based on [17]

Otrzymane wykresy mają zmienną długość osi  $x$ . Na ich podstawie tworzony jest jeden globalny histogram o stałej długości. Każdy przedział tego histogramu reprezentuje inną kombinację tranzycji (przejścia) pomiędzy woksalami różnych kategorii (włączając kategorię 0), przy czym pary  $\langle \text{kategoria}_a, \text{kategoria}_b \rangle$  oraz  $\langle \text{kategoria}_b, \text{kategoria}_a \rangle$  są równoważne. Przedziały histogramu są wypełniane liczbami poszczególnych tranzycji występujących we wszystkich wykresach. Rozmiar histogramu jest równy liczbie 2-elementowych kombinacji z powtórzeniami ze zbioru  $nc$ -elementowego, gdzie  $nc$  jest liczbą kategorii powierzchni, włączając kategorię 0 (woksali pustych):  $(nc + 2) \cdot (nc + 1)/2$ .

Dla  $nc = 6$  liczba ta jest równa 21, a więc GRSD jest opisywany przez histogram składający się z 21 przedziałów.

### 2.3. Ensemble of Shape Functions

Deskryptor Ensemble of Shape Functions został (ESF, pol. Zestaw Funkcji Kształtu) przedstawiony w [21]. Jest on kombinacją trzech różnych funkcji kształtu opisujących następujące właściwości chmury punktów: odległości i kąty pomiędzy punktami oraz obszary utworzone przez poszczególne punkty. ESF jest unikalny, ponieważ nie wymaga obliczania normalnych do powierzchni, ani żadnego przetwarzania wstępnego z wyjątkiem utworzenia siatki wokseli chmury, która aproksymuje rzeczywistą powierzchnię. Deskryptor składa się z 10 histogramów, z których każdy zawiera 64 przedziały. Algorytm tworzenia histogramów wykonuje się zadaną liczbę  $esf_n$  razy (domyślnie wartość ta równa jest 20000). W każdej iteracji losowane są 3 punkty  $p_1, p_2, p_3$ , dla których obliczane są cechy:  $D2, D2\text{-ratio}, D3, A3$ .

$D2$  jest cechą składającą się z trzech histogramów. Do jej wyznaczenia obliczane są odległości pomiędzy punktami  $p_1, p_2, p_3$ . Następnie dla każdej pary algorytm sprawdza, czy linia łącząca punkty leży: a) całkowicie na powierzchni chmury, b) całkowicie poza nią (z wyjątkiem punktów początkowego i końcowego), czy c) częściowo na powierzchni, częściowo poza nią. W zależności od tego, wartość będąca odległością punktów umieszczana jest w jednym z trzech histogramów: IN, OUT lub MIXED.

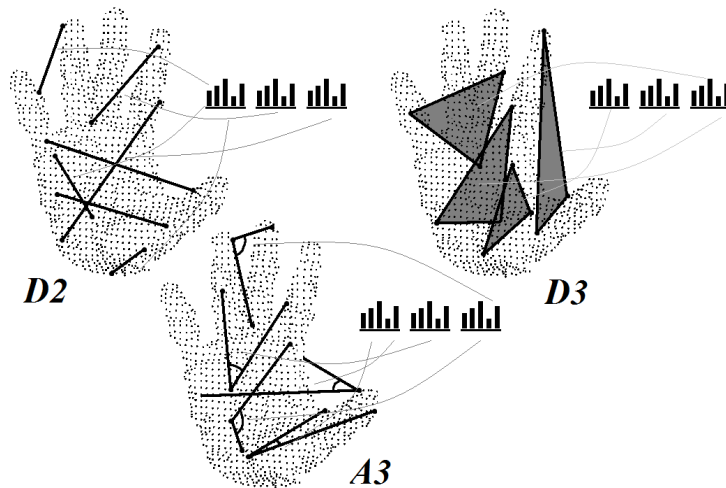
$D2\text{-ratio}$  jest opisana przez pojedynczy histogram, którego wartości określają stosunek między długościami fragmentów linii leżących na powierzchni i poza nią. Jedynie linie zakwalifikowane do histogramu MIXED są brane pod uwagę.

$D3$  obejmuje 3 histogramy. Wyznaczenie tej cechy polega na obliczeniu pierwiastka kwadratowego powierzchni trójkąta, którego wierzchołki znajdują się w punktach  $p_1, p_2, p_3$ . Wartości te są umieszczane w trzech histogramach, podobnie jak w przypadku cechy  $D2$ , w zależności od tego, czy boki trójkąta leżą w całości na powierzchni chmury, w całości poza nią, czy częściowo na i częściowo poza powierzchnią.

$A3$  składa się z trzech histogramów, których wygenerowanie polega na wyznaczeniu kątów pomiędzy liniami utworzonymi z połączeń punktów  $p_1, p_2, p_3$ . Wartości te są umieszczane w trzech histogramach, analogicznie do cechy  $D3$ , czyli w zależności od pokrycia powierzchni trójkątów utworzonych przez trójki punktów z powierzchnią chmury.

Rys. 4 ilustruje metodę wyznaczania poszczególnych cech. Autorzy ESF twierdzą, że deskryptor radzi sobie z różnicami w charakterystyce kamer, z których pobierane są chmury punktów, umożliwiając stworzenie solidnej metody klasyfikacji obiektów 3D.





Rys. 4. Cechy ESF;  
Fig. 4. Features of the ESF;

### 3. System rozpoznawania układów dłoni

Opracowany system rozpoznawania układów dłoni składa się z następujących elementów: (i) segmentacja dłoni, (ii) rotacja dłoni, (iii) konwersja mapy głębi na chmurę punktów, (iv) próbkowanie (ang. down-sampling), (v) wyznaczenie bryły brzegowej i jej podział na komórki (vi) ekstrakcja oraz normalizacja cech, (vii) klasyfikacja.

Segmentacja przeprowadzana jest w celu oddzielenia dłoni od pozostałych fragmentów chmury punktów tak, aby cechy deskryptora wyznaczone były jedynie dla obiektu zainteresowania (dłoni). W naszym systemie rozpoznawania zastosowano algorytm segmentacji opracowany w [3] z pewnymi modyfikacjami, których szczegóły wykraczają poza tematykę niniejszego artykułu.

Rotacja chmury wokół osi  $z$  przeprowadzana jest w taki sposób, aby wektor o początku znajdującym się w środku dłoni oraz końcu w jej najbardziej wysuniętym punkcie (najczęściej jest to najdłuższy z wystawionych palców) miał kierunek zgodny z osią  $y$ . Pozwala to uniezależnić metodę rozpoznawania dłoni od jej obrotów wokół osi  $z$ . Segmentację i rotację przeprowadza się na mapach głębi, czyli dwuwymiarowych tablicach, których elementy określają głębie w danym punkcie. Jeśli więc dane zapisane są w postaci chmury punktów, należy je wczytać jako mapę głębi przed wykonaniem punktu (i) oraz (ii).

Po przeprowadzeniu tych operacji mapa głębi konwertowana jest na chmurę punktów. Współrzędne chmury punktów  $PC_i^x$ ,  $PC_i^y$  i  $PC_i^z$  są ustawiane w zależności od wartości mapy głębi  $DA_i^z$  zgodnie z parametrami kamery (z której pozyskano dane) oraz równaniami rzutowania perspektywicznego:

$$PC_i^x = \frac{(DA_i^z + fl) * \left(\frac{DA_{width}}{2} - DA_i^x - 1\right) * ps^x}{fl} \quad (7)$$

$$PC_i^y = \frac{(DA_i^z + fl) * \left(\frac{DA_{height}}{2} - DA_i^y - 1\right) * ps^y}{fl} \quad (8)$$

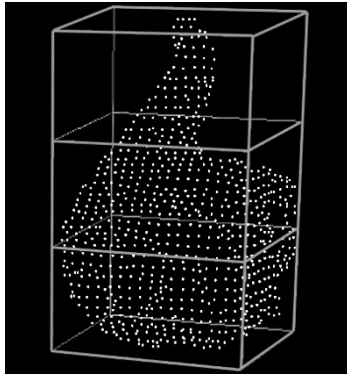
$$PC_i^z = DA_i^z \quad (9)$$

gdzie:  $DA_{width}$  – liczba kolumn mapy głębi,  
 $DA_{height}$  – liczba wierszy mapy głębi,  
 $fl$  – długość ogniskowej kamery,  
 $ps^x$  i  $ps^y$  – wymiary pikseli, odpowiednio wysokość i szerokość.

W przypadku naszych eksperymentów, dane zostały pobrane z kamery Kinect™, której parametry pobrano z [22] i ustawiono następująco:  $fl = 4.73$  mm,  $ps^x = ps^y = 0.0078$  mm.

Kolejnym etapem systemu rozpoznawania układów dłoni jest redukcja chmury punktów poprzez próbkowanie. Polega ono na zmniejszeniu liczby punktów wchodzących w skład nadmiarowo gęstej chmury i stosuje się go, aby przyspieszyć obliczenia związane z wyznaczaniem deskryptorów. W tym celu, w miejscach w których znajdują się punkty tworzy się siatkę prostopadłościennych wokseli, które są reprezentowane przez pojedynczy punkt zlokalizowany w ich środku ciężkości. Punkty te tworzą nową, zredukowaną chmurę. Parametrem metody są wymiary wokseli  $V_x \times V_y \times V_z$ . W naszych eksperymentach zdecydowaliśmy się użyć wokseli sześciennych o wymiarach:  $V_x = V_y = V_z = 0.0045$  m, ponieważ nie ma przesłanek, żeby poszczególne wymiary nie były sobie równe. Drogą eksperymentalną stwierdzono, że taki rozmiar wokseli jest wystarczający do obliczenia reprezentatywnych histogramów rozpatrywanych deskryptorów.

Aby wyznaczyć cechy deskryptorów, należy utworzyć bryłę brzegową, czyli najmniejszy prostopadłościan kompletnie otaczający chmurę punktów. Bryła brzegowa wpasowuje się w chmurę nie tworząc przestrzeni pomiędzy najbardziej wystającymi punktami a ścianą. Aby zwiększyć dystynktywność deskryptorów, bryła brzegowa jest dzielona na prostopadłościennie komórki i cechy deskryptora liczone są dla każdej z nich niezależnie. Nasze eksperymenty przeprowadzone w [5] pokazały, że dzielenie bryły brzegowej na 3 horyzontalne komórki (patrz rys. 5) daje najlepsze rezultaty w rozpoznawaniu gestów wykonywanych dłonią, np. statycznych postur dłoni (sprawdzono również 3 wertykalne komórki, 9 komórek oraz brak podziału). W związku z tym w naszych badaniach wykorzystano ten właśnie podział.



Rys. 5. Zredukowana chmura punktów przedstawiająca dłoń z wystawionym kciukiem oraz jej bryła brzegowa podzieloną na trzy horyzontalne komórki

Fig. 5. Downsampled point cloud corresponding to an arm with extended thumb and its bounding box divided to three horizontal cells

Pojedyncze cechy deskryptora VFH składają się z jednego histogramu o rozmiarze 45 przedziałów, natomiast cechy ESF – z trzech histogramów po 64 przedziały. Aby uniknąć problemu związanego z przekleństwem wymiarowości, wynikającego ze zbyt dużej liczby wymiarów danych [2], histogramy reprezentowane są przez ich średnią i odchylenie standardowe. Następnie wartości te są normalizowane do zakresu [0-1] względem maksimum i minimum znajdującym się w zbiorze treningowym i w takiej postaci umieszczane są w wektorze cech. Deskryptor GRSD zawiera tylko jeden histogram o wielkości 21 przedziałów. W tym przypadku testy przeprowadzono zarówno dla całych histogramów, gdzie pojedyncze wartości przedziałów stanowiły cechy w wektorze, oraz dla ich reprezentacji poprzez średnią i odchylenie standardowe.

Rozmiar wektora cech, oznaczonego jako  $FV_{size}$ , wylicza się następująco:

$$FV_{size} = nc \cdot \sum_{i=1}^{nf} nh_i \cdot nr_i \quad (10)$$

gdzie:  $nc$  – liczba komórek, na które dzielona jest bryła brzegowa,

$nf$  – liczba cech deskryptorów,

$nh_i$  – liczba histogramów, z których składa się  $i$ -ta cecha,

$nr_i$  – liczba reprezentantów histogramów  $i$ -tej cechy (wartość 2 w przypadku reprezentacji histogramów jako średnia i odchylenie standardowe).

Przykładowo, gdy wektor cech składa się z jednej cechy VFH, jednej ESF i jednej GRSD (dla przypadku reprezentowania histogramu przez każdy przedział, tj. bez liczenia średniej i odchylenia standardowego), rozmiar wektora cech jest równy  $3 \cdot ((1 \cdot 2) + (3 \cdot 2) + (1 \cdot 21)) = 87$ . Warto zwrócić uwagę,

że duży rozmiar wektora cech, oprócz wspomnianego zjawiska przekleństwa wymiarowości, jest również niekorzystny pod względem prędkości uczenia klasyfikatora oraz samej klasyfikacji.

Ostatnim etapem systemu rozpoznawania układów dłoni jest klasyfikacja. Do tego celu wykorzystaliśmy klasyfikator  $k$ -najbliższych sąsiadów z odległością euklidesową i parametrem  $k = 1$  [7].

#### 4. Wyniki eksperymentów

Eksperymenty przeprowadzone w ramach niniejszej pracy polegały na testowaniu pojedynczych cech każdego deskryptora oraz łączonych cech jednego i różnych deskryptorów w rozpoznawaniu statycznych układów dłoni. Wykorzystany został zbiór danych przedstawiony w [13]. Zawiera on 10 układów dłoni pokazywanych 10 razy przez 10 osób, co daje łącznie 1000 plików w formie map głębi. Wszystkie gesty statyczne dłoni zawarte w używanym zbiorze danych zostały przedstawione na rys. 5. Eksperymenty polegały na wykonywaniu w każdym przypadku 5-krotnej walidacji krzyżowej uzyskując w ten sposób procentowy wynik skuteczności klasyfikacji. Dla każdego testu walidacyjnego dzielono zbiór danych na 5 rozłącznych podzbiorów, z których 1 pełnił rolę zbioru testowego, a pozostałe 4 stanowiły zbiór treningowy. Podział zbioru danych przeprowadzany był w taki sposób, aby w zbiorze testowym nie znajdowały się gesty pokazane przez osoby występujące w zbiorze treningowym. Dzięki temu system rozpoznawania gestów może być testowany pod kątem właściwości uogólniających i niezależności od osoby.

Tabela 1 przedstawia wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla pojedynczych cech każdego z deskryptorów uzupełnione o wielkość wektora w cech dla każdego przypadku. Testy walidacji krzyżowej zostały wykonane jednokrotnie dla cech deskryptorów FVH oraz GRSD, natomiast w przypadku ESF przeprowadzono 30 identycznych testów, a następnie obliczono wartość średnią wyników. Powodem tego działania jest niedeterministyczny charakter metody liczenia histogramów ESF, który wynika z wielokrotnego losowania punktów  $p_1, p_2, p_3$  i skutkuje niewielkimi różnicami w histogramach wygenerowanych dla tej samej chmury punktów. Oznacza to, że wyniki dla każdego testu przeprowadzonego w identycznych warunkach mogą się różnić. Aby wykazać, że różnice te są niewielkie i akceptowalne, w każdym przypadku oprócz średniej obliczono również odchylenie standardowe z wyników 30 testów walidacji.



Rys. 6. Układy dłoni (wraz z etykietami) zawarte w zbiorze danych użytym w celu ewaluacji metody rozpoznawania

Fig. 6. Postures (with labels) included in the dataset used for the evaluation of the recognition method

Tabela 1. Wyniki testów 5-krotnej walidacji krzyżowej; pojedyncze cechy deskryptorów; skuteczność klasyfikacji oraz odchylenie standardowe wyników podano w procentach

Table 1. Results of 5-fold cross-validation tests; single descriptor features; recognition rates and standard deviations of results are given in percentages

<i>Cecha deskryptora</i>	<i>Skuteczność klasyfikacji</i>	<i>Odch. std. testów (tylko ESF)</i>	<i>Rozmiar wektora cech</i>
<i>VFH(<math>\theta</math>)</i>	50.8	-	6
<i>VFH(<math>\alpha</math>)</i>	40.6	-	6
<i>VFH(<math>\Phi</math>)</i>	62.2	-	6
<i>VFH(<math>d</math>)</i>	76.1	-	6
<i>ESF(D2)</i>	86.64	0.43	18
<i>ESF(D2-ratio)</i>	54.61	0.59	6
<i>ESF(D3)</i>	81.71	0.51	18
<i>ESF(A3)</i>	88.46	0.5	18
<i>GRSD(całe histogramy)</i>	56	-	63
<i>GRSD(średnia i odch. std. Histogramów)</i>	44.8	-	6

Najlepszą w rozpoznawaniu gestów statycznych cechą VFH okazała się  $d$  - rozkład odległości punktów. W przypadku ESF najskuteczniejsza okazała się cecha A3, analizująca kąty pomiędzy liniami utworzonymi z trójek punktów. Uzyskany w tym przypadku wynik poprawności klasyfikacji – 88.46% jest najlepszym rezultatem spośród wszystkich analizowanych cech deskryptorów. Histogramy GRSD reprezentowane za pomocą średniej i odchylenia standardowe-

go poskutkowały stosunkowo niską skutecznością klasyfikacji, podczas gdy wynik uzyskany poprzez zawarcie całych histogramów w wektorze cech jest o 11.2% większy. W tym przypadku jednak wektor cech jest bardzo liczny (63 cechy), szczególnie w porównaniu do pozostałych cech deskryptorów.

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych przy użyciu łączonych cech tych samych oraz różnych deskryptorów zostały przedstawione w Tabeli 2. Ze względu na dużą liczbę analizowanych cech, przedstawiono jedynie wybrane połączenia cech (np. połączenia cech, które okazały się najlepsze w poprzednich eksperymentach). W przypadku połączeń zawierających cechy ESF przeprowadzono 30 testów 5-krotnej walidacji krzyżowej w sposób analogiczny do eksperymentów z pojedynczymi cechami deskryptorów.

Tabela 2. Wyniki testów 5-krotnej walidacji krzyżowej; łączone cechy deskryptorów; skuteczność klasyfikacji oraz odchylenie standardowe wyników podano w procentach

Table 2. Results of 5-fold cross-validation tests; combined descriptor features; recognition rates and standard deviations of results are given in percentages

<i>Cechy deskryptorów</i>	<i>Skuteczność klasyfikacji</i>	<i>Odch. std. testów (tylko ESF)</i>	<i>Rozmiar wektora cech</i>
<i>VFH(<math>\Phi</math>)+VFH(<math>d</math>)</i>	90.9	-	12
<i>VFH(<math>\theta</math>)+VFH(<math>\Phi</math>)+VFH(<math>d</math>)</i>	89.4	-	18
<i>VFH(<math>\theta</math>)+VFH(<math>\alpha</math>)+VFH(<math>\Phi</math>)+VFH(<math>d</math>)</i>	92.3	-	24
<i>VFH(<math>\theta</math>)+VFH(<math>\alpha</math>)+VFH(<math>\Phi</math>)</i>	75.1	-	18
<i>ESF(D2)+ESF(D2-ratio)</i>	87.59	0.31	24
<i>ESF(A3)+ESF(D2)</i>	91.8	0.48	36
<i>ESF(A3)+ESF(D2-ratio)</i>	90.76	0.49	24
<i>ESF(A3)+ESF(D2)+ESF(D2-ratio)</i>	92.27	0.37	42
<i>ESF(A3)+ESF(D3)+ESF(D2)+ESF(D2-ratio)</i>	91.95	0.47	60
<i>ESF(A3)+VFH(<math>d</math>)</i>	93.61	0.31	24
<i>ESF(A3)+VFH(<math>\Phi</math>)+VFH(<math>d</math>)</i>	94.79	0.44	30
<i>ESF(A3)+VFH(<math>\theta</math>)+VFH(<math>\alpha</math>)+VFH(<math>\Phi</math>)+VFH(<math>d</math>)</i>	95.28	0.33	42
<i>GRSD(całe histogramy)+ESF(A3)</i>	81.98	0.47	81
<i>GRSD(całe histogramy)+VFH(<math>d</math>)</i>	83.7	-	69

W przypadku VFH najskuteczniejszym okazało się połączenie wszystkich cech komponentu kształtu powierzchni ( $\theta+d+\Phi+\alpha$ ). Należy jednak zauważyć, że wybierając dwie najlepsze cechy z poprzednich eksperymentów ( $\Phi+d$ ) uzyskujemy poprawność klasyfikacji mniejszą jedynie o 1.4%, natomiast rozmiar wektora cech zmniejsza się dwukrotnie (z 24 na 12). Deskryptor ESF

w całości (wszystkie cechy) uzyskał skuteczność klasyfikacji zbliżoną do komponentu kształtu powierzchni VFH, jednak przy 2.5 razy większym wektorze cech. Połączenie cech różnych deskryptorów  $ESF(A3)+VFH(d)$  poskutkowało poprawnością klasyfikacji 93.61, natomiast wektor cech ma ten sam rozmiar, który uzyskujemy w przypadku połączenia wszystkich cech komponentu kształtu powierzchni VFH. Nieco większe wektory cech oraz lepsze skuteczności klasyfikacji uzyskaliśmy z połączenia  $ESF(A3)+VFH(\Phi)+VFH(d)$  oraz  $ESF(A3)+VFH(\theta)+VFH(\alpha)+VFH(\Phi)+VFH(d)$ . Uzyskane w ten sposób wyniki, odpowiednio 94.79% i 95.28%, są najlepsze wśród wszystkich przeprowadzonych testów walidacji krzyżowej. Połączenia cech zawierające histogramy GRSD okazały się znacznie słabsze niż najlepsze połączenia cech VFH i ESF. Warto jednak zauważyć, że GRSD wzmocnił wpływ  $VFH(d)$ , podczas gdy osłabił  $ESF(A3)$ .

Ciekawym spostrzeżeniem jest fakt, że cecha  $ESF(A3)$ , czyli informacja na temat kątów pomiędzy liniami utworzonymi z trójek punktów, okazała się lepsza od informacji traktującej o zależnościach kątowych między normalnymi do powierzchni rozpiętej na chmurze punktów, którą reprezentuje  $VFH(\theta)+VFH(\Phi)+VFH(\alpha)$ . Jednak w połączeniu z cechą  $VFH(d)$ , określającą rozkład odległości pomiędzy poszczególnymi punktami, lepszą skuteczność klasyfikacji (przy takim samym rozmiarze wektora cech) otrzymujemy w przypadku cech osobnego deskryptora ESF niż tego samego deskryptora VFH.

Za punkt kompromisu pomiędzy skutecznością klasyfikacji, a ilością wymiarów danych (czyli rozmiarem wektora cech) można uznać kombinację cech  $ESF(A3)+VFH(d)$  (skuteczność: 93.61%, rozmiar wektora: 24) lub  $ESF(A3)+VFH(\Phi)+VFH(d)$  (skuteczność: 94.79%, rozmiar wektora: 30). W przypadku pierwszej z wymienionych kombinacji, odchylenie standardowe z 30 testów walidacji krzyżowej wynosi 0.31%, natomiast dla drugiej kombinacji - 0.44%, a więc biorąc pod uwagę mniejszy rozrzut poprawności klasyfikacji, co może mieć znaczenie w przypadku stosowania metody w praktyce, pierwsza kombinacja wydaje się najlepszym kompromisem.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono porównanie poszczególnych cech trzech deskryptorów chmur punktów w rozpoznawaniu statycznych układów dłoni. Omówiono ideę i algorytm wyznaczania każdego deskryptora, metodę rozpoznawania układów dłoni oraz sposób przeprowadzania eksperymentów. Zamieszczono wyniki testów walidacji krzyżowej w postaci tabelarycznej oraz wnioski i spostrzeżenia na ich temat. Główną konkluzją niniejszego artykułu jest stwierdzenie, że analizowane deskryptory chmur punktów nie muszą występować w całości oraz samodzielnie. Usuwanie poszczególnych cech danego de-

skryptora i łączenie ich z wybranymi cechami innych deskryptorów może się przyczynić do poprawy skuteczności klasyfikacji, co zostało sprawdzone na przykładzie chmur punktów reprezentujących statyczne układy dłoni. Ponadto, z przeprowadzonych eksperymentów można wywnioskować, że deskryptory VFH oraz ESF są bardziej odpowiednie dla rozpoznawania kształtów dłoni niż deskryptor GRSD.

## Literatura

- [1] Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.: Speeded-Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, tom 110, wydanie 3, czerwiec 2008, pp. 346-359.
- [2] Bellman, R. E.: *Adaptive Control Processes*, Princeton, NJ. Press, 1961.
- [3] Dominio F., Donadeo M., Zanuttigh P.: Combining multiple depth-based descriptors for hand gesture recognition, *Pattern Recognition Letters*, tom 50, grudzień 2014, pp. 101-111.
- [4] Kapuscinski T., Oszust M., Wysocki M.: Recognition of signed dynamic expressions observed by ToF camera, *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*: pp. 291-296, Poznan 2013.
- [5] Kapuscinski T., Oszust M., Wysocki M., Warchol D.: Recognition of hand gestures observed by depth cameras, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015.
- [6] Keskin C., Kirac F., Kara Y. E., Akarun L.: Real time hand pose estimation using depth sensors, *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, 2011 IEEE International Conference on, pp. 1228-1234, Barcelona 2011.
- [7] Larose, D. T.: *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining*, John Wiley & Sons, 2014, pp. 90-106.
- [8] Marton Z.C., Pangeric D., Blodow N., Beetz M.: Combined 2D-3D categorization and classification for multimodal perception systems, *International Journal of Robotics Research*, tom 10, wydanie 11, wrzesień 2011, pp. 1378-1472.
- [9] Marton Z.C., Pangeric D., Blodow N., Kleinhellefort J., Beetz M.: General 3D modelling of novel objects from a single view, *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 3700-3705, Taipei 2010.
- [10] Marton Z.C., Pangeric D., Rusu R. B., Holzbach A., Beetz M.: Hierarchical object categorization and appearance classification for mobile manipulation, *Humanoid Robots (Humanoids)*, 2010 10th IEEE-RAS International Conference on, pp. 365-370, Nashville 2010.
- [11] Molina J., Escudero-Viñolo A., Signoriello A., Pardàs M., Ferràn C., Bescós J., Marqués F., Martínez J. M.: Real-time user independent hand gesture recognition from time-of-flight camera video using static and dynamic models, *Machine Vision and Applications*, tom 24, wydanie 1, styczeń 2013, pp. 187-204.



- [12] Oprisescu S. R.: Automatic static hand gesture recognition using ToF cameras, European Signal Processing Conference, pp. 2748-2751, Bucharest 2012.
- [13] Ren Z., Yuan J., Zhang Z.: Robust hand gesture recognition based on finger-earth mover's distance with a commodity depth camera, MM '11 Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia, 2011, pp. 1093-1096.
- [14] Rusu R. B., Blodow N., Beetz M.: Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration, Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on, pp. 3212-3217, Kobe 2009.
- [15] Rusu R. B., Bradski G., Thibaux R.: Fast 3D recognition and pose using the Viewpoint Feature Histogram, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 2155-2162, Taipei 2010.
- [16] Rusu R. B., Cousins S.: 3D is here: Point Cloud Library (PCL), Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, pp. 1-4, Shanghai 2011.
- [17] Rusu R. B., Holzbach A., Beetz M.: Detecting and Segmenting Objects for Mobile Manipulation, Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009 IEEE 12th International Conference on, pp. 47-54, Kyoto 2009.
- [18] Rusu R., Marton Z. C., Blodow N.: Learning informative point classes for the acquisition of object model maps, Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on, pp. 643-650, Hanoi 2008.
- [19] Uebersax D., Gall J., Van den Bergh M.: Real-time sign language letter and word recognition from depth data, Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on, pp. 383-390, Barcelona 2011.
- [20] Van den Bergh M., Van Gool L.: Combining RGB and ToF cameras for real-time 3D hand gesture interaction, Applications of Computer Vision (WACV), 2011 IEEE Workshop on, pp. 66-72, Kona 2011.
- [21] Wohlkinger W., Vincze M.: Ensemble of Shape Functions for 3D object classifications, Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on, pp. 2987-2992, Phuket 2011.
- [22] <http://kinectexplorer.blogspot.com> (aktualizacja 13 grudzień 2011).

## COMPARING AND COMBINING OF POINT CLOUD DESCRIPTORS' FEATURES IN STATIC HAND POSTURE RECOGNITION

### Summary

The paper presents the method of recognizing static hand postures using three point cloud descriptors: Viewpoint Feature Histogram (VFH), Global Radius-Based Surface Descriptor (GRSD) and Ensemble of Shape Functions (ESF). These descriptors describe point clouds with the usage of the voxel grid, vectors normal to the cloud surface, distributions of the points' distances to their neighbors, and radii of spheres inscribed to parts of the surface. The cross-validation tests have been performed yielding the comparison of classification correctness for the single features, combined features of the same descriptor and of different descriptors. The tests have been per-

formed on a dataset containing 1000 depth maps: 10 different hand postures shown 10 times by 10 subjects. Before the feature extracting process, each point cloud must be preprocessed, including: segmentation (in order to separate the hand from the other cloud parts), rotation related to the hand center and the longest extended finger (in order to make the algorithm independent from the hand rotations around the axis perpendicular to the camera lens), and the points reduction (in order to make the calculations faster). The results are complemented by an additional information – the size of the feature vector used in the classification. It allows to find a combination of features that constitutes a point of compromise between the classification correctness and the number of data dimensions.

**Keywords:** point cloud descriptors, Viewpoint Feature Histogram, Global Radius-Based Surface Descriptor, Ensemble of Shape Functions

DOI: 10.7862/re.2016.5

*Tekst złożono w redakcji:* styczeń 2016

*Przyjęto do druku:* marzec 2016

## Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w numerze 294 Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, *Elektrotechnika* z. 35 (4/2016) oraz zamieszczona na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/>
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/>
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronach internetowych:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/>  
oraz  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>  
w zakładce „Instrukcja dla autorów”.
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą również opublikowane w czwartym numerze *Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika*, z. 35 (4/2016).