

PROGRAM WIELOLETNI
„Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”
V etap, okres realizacji: lata 2020-2022

Część B: Program realizacji projektów w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych

Sprawozdanie etapowe

Symbol projektu III.PB.20

Tytuł projektu: *Opracowanie systemu do monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych oraz wykrywania obecności pracowników w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi.*

Termin rozpoczęcia 01.01.2020r.

Termin zakończenia 31.12.2022r.

Numer etapu 2

Nazwa etapu: *Opracowanie oprogramowania do systemu monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych pracowników oraz rejestracji ich obecności w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi.*

Słowa kluczowe: synchronizacja danych, położenie pracownika w strefie zagrożenia, pomiar parametrów fizjologicznych

Termin rozpoczęcia 01.04.2021r.

Termin zakończenia 30.04.2022r.

WYKONAWCA /nazwa jednostki/: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

	Imię i nazwisko	Podpis
Kierownik projektu :	Piotr Guzdek	
Wykonawcy:	Piotr Maćków	
	Artur Polak	
	Piotr Zachariasz	
	Mariusz Taborski	

Spis treści

Harmonogram realizacji projektu	str. 3
Streszczenie	str. 4
Dotychczasowy stan wiedzy w problematyce realizowanego projektu oraz uzasadnienie naukowe i użyteczne podjęcia projektu	str. 4
Cele projektu i sprawozdawanego etapu (ogólny i szczegółowe)	str. 6
Opis wykonanych prac	str. 6
Wnioski	str. 13

Harmonogram realizacji projektu

TEMAT ETAPU	PODMIOT REALIZUJĄCY	DATA ROZPOCZĘCIA ETAPU	DATA ZAKOŃCZENIA ETAPU
Opracowanie modelu systemu identyfikacji i monitorowania obecności pracowników w strefie zagrożenia współpracującego z sensorami do monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych pracowników	Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki	01.01.2020	31.03.2021
Opracowanie oprogramowania do systemu monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych pracowników oraz rejestracji ich obecności w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi. Opracowana publikacja.		01.04.2021	30.04.2022
Badania laboratoryjne opracowanego systemu oraz jego weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Opracowana publikacja		01.05.2022	31.12.2022

Streszczenie

W ramach zrealizowanych prac badawczych w ramach II etapu projektu, opracowano koncepcję działania systemu monitoringu w strefie zagrożenia. W opracowanym systemie lokalizacja pracownika następuje poprzez pomiar mocy sygnału. Pracownik wyposażony jest urządzenie, które odbiera sygnały z rozmieszczonych beaconów i przekazuje je jednostki centralnej. Na tej podstawie możliwe jest określenie położenia pracownika. Granice stref niebezpiecznych mogą być ustawione na sztywno poprzez przypisanie konkretnych beaconów do granicy strefy lub strefa ta może być określana dynamicznie na podstawie pomiarów z sieci czujników.

W ramach etapu zaprojektowano i wykonano również system synchronizacji danych z czujników i modułów lokalizujących pracownika. Celem badawczym było opracowanie skutecznych metod synchronizacji i obróbki danych uzyskiwanych z różnych urządzeń pomiarowych. Realizacja systemu synchronizacji zegarów wymaga posiadania dokładnego zegara wzorcowego. Zdecydowano o zastosowaniu w tej roli odbiornika GPS u-blox NEO-6M, który generuje sygnał PPS (Pulse-Per-Second).

Opracowano oprogramowanie do pomiaru i analizy danych z czujników gazów, nacisku, położenia, tętna. Przedstawiono przykładowe dane pomiarowe parametrów fizjologicznych pracowników i ich wizualizację. Opracowano sensory do pomiaru fali tętna, które mogą posłużyć do wyznaczania tętna, ciśnienia krwi oraz mogą służyć do diagnostyki niektórych chorób zawodowych. Opracowano system do wyznaczania trajektorii ruchu pracownika. Do pomiaru położenia pracownika i jego środka ciężkości zastosowano akcelerometr i żyroskop. Akcelerometr pozwala określić położenie urządzenia, natomiast żyroskop pozwala dodatkowo śledzić zmiany położenia względem osi X, Y i Z. Powyższy system umożliwi śledzenie trajektorii przemieszczania się pracownika a także analizę ergonomii podczas wykonywania czynności na stanowisku pracy, co może ograniczyć liczbę wypadków przy pracy, ewentualnie ograniczyć ryzyko eskalacji choroby zawodowej związanej z nieprawidłowym wykonywaniem czynności na stanowisku pracy.

Dotychczasowy stan wiedzy w problematyce realizowanego etapu oraz uzasadnienie naukowe i użyteczne podjęcia etapu

Ze względu na zagrożenia związane z wykonywaniem czynności zawodowych istnieje potrzeba ciągłego monitorowania warunków środowiska pracy, jak również stanu zdrowia pracowników. Z tego powodu rozwiązania systemowe oraz środki ochrony indywidualnej przeznaczone do użytku w niebezpiecznych warunkach pracy wyposaża się w elementy sensoryczne lub układy elektroniczne umożliwiające monitorowanie warunków pracy oraz sygnalizację zmiany intensywności zagrożeń i wzrost ryzyka. Obecnie, rozwiązania z zakresu ciągłego monitorowania różnorodnych parametrów (parametry procesów przemysłowych, jakości środowiska, funkcji życiowych) są szeroko opracowywane i badane ze względu na szybki rozwój technologii Internetu Rzeczy (IoT). Technologia ta umożliwia tworzenia inteligentnych sieci sensorowych, w ramach której urządzenia komunikują się między sobą i łączą się ze światem fizycznym, dzięki czemu dostarczają informacji i usług użytkownikom [1]. Technologia IoT została pomyślnie wdrożona w systemie opieki zdrowotnej [2], transporcie i logistyce, monitorowaniu środowiska, inteligentnych budynkach, kontroli i zarządzaniu procesami przemysłowymi (Industry 4.0) [3]. Istnieje też druga strona medalu. Pozyskiwane dane są często danymi wrażliwymi, które nie mogą wydostawać się poza sieć. Jednak według raportu firmy Hewlett Packard ponad 70% urządzeń w IoT jest niezabezpieczonych [4]. A więc środowisko IoT narażone jest na ataki w celu przechwycenia danych. Ze względu na powyższe problemy sieci zbudowane w oparciu o IoT muszą zostać wyposażone w techniki kryptograficzne zapewniające cyberbezpieczeństwo systemu [5].

Urządzenia sensoryczne stosowane są do monitorowania zjawisk zachodzących na interesującym nas obszarze badań [6-8]. Obserwacja zachodzi nie na pojedynczym węźle a

z pomocą sieci węzłów (system rozproszony), gdzie poszczególne węzły tworzą tzw. sieć ad-hoc, [6,7]. Rozproszone systemy monitorowania zbudowane są w oparciu o lokalne układy wbudowane, z których każdy jest wyposażony w odpowiedni procesor (układ System On Chip). Konstrukcja systemów rozproszonych ma architekturę modułową umożliwiającą dowolne konfigurowanie systemu monitoringu, a ich integracja jest realizowana najczęściej przez złącza teleinformatyczne wyposażone w odpowiedni protokół transmisji danych [9]. Podstawowym zadaniem lokalnego układu monitorowania jest zasilanie czujnika, wstępne przetwarzanie sygnału, wyznaczenie estymatora wymaganego dla oceny stanu środowiska oraz rejestracja danych w czasie realizacji pomiarów.

Synchronizacja pomiarów w systemach rozproszonych jest procesem bardziej złożonym niż w systemach scentralizowanych. W zagadnieniach synchronizacji procesów na wielu urządzeniach nie jest istotna znajomość czasu absolutnego. Istotne jest, aby procesy mogły ustalić kolejność zdarzeń. Z tego powodu pomiar czasu możemy podzielić na dwa elementy:

- pomiar czasu fizyczny – wskazują czas astronomiczny,
- pomiar czasu logiczny – zegary o wzajemnie uzgodnionym czasie, niekoniecznie astronomicznym.

System rozproszony powinien być niewrażliwy na awarie poszczególnych urządzeń i niedopuszczalna jest sytuacja, w której jednostka centralna ulega awarii i mamy do czynienia z blokadą całego systemu. Dlatego też o efektywności działania systemu rozproszonego decyduje grupa komputerów o podobnych parametrach, a nie jednostka centralna. Najczęściej, w celu synchronizacji wielu komputerów, stosuje się protokół NTP (ang. Network Time Protocol) [10-12]. Implementacja protokołu NTP pozwala na precyzyjną synchronizację czasu (rzędu milisekund) w bardzo dużych sieciach komputerowych (tysiące komputerów), bez przeciążenia łączy i procesorów. Aby zrealizować ten cel NTP nie przekazuje klientom absolutnej wartości czasu tylko statystykę dostępu do wybranego źródła czasu UTC. Statystyka ta zawiera między innymi informacje o bieżącej precyzji zegara wzorcowego i lokalnego zegara systemowego oraz informację o istniejących opóźnieniach i różnicach czasowych liczonych względem źródła czasu UTC. Znając bieżące opóźnienie panujące w sieci i dysponując tak bogatą statystyką każdy z klientów NTP może sam indywidualnie skalibrować czas swojego zegara systemowego. Kalibracja polega na płynnym przyspieszaniu lub spowalnianiu pracy lokalnego zegara.

1. K. Jaiswal, S. Sobhanayak, B. Kumar Mohanta; D. Jena, IoT-cloud based framework for patient's data collection in smart healthcare system using raspberry-pi, International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), (2017), 1-4.
2. D. Jain, P. Venkata Krishna, V. Saritha, A study on Internet of Things based applications, arXiv:1206.3891, School of Computing Science and Engineering VIT University, Vellore, TN, India, 2012.
3. S. A. Kumar, T. Vealey and H. Srivastava, Security in internet of things: Challenges, solutions and future directions, IEEE In 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), (2016) 5772-5781.
4. D. Engels, X. Fan, G. Gong, H. Hu and E. M. Smith, Ultra-lightweight cryptography for low-cost RFID tags: Hummingbird algorithm and protocol, Centre for Applied Cryptographic Research (CACR) Technical Reports, vol. 29 (2009).
5. M. Katagi and S. Moriai, Lightweight cryptography for the internet of things, Sony Corporation, (2008) 7-10.
6. J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, „Wireless Sensor Network Survey”, Computer Networks, vol. 52, no. 12, (2008) 2292-2330.

7. M. Ghanem, Y. Guo, J. Hassard, M. Osmond and M. Richards, „Sensor Grids For air Pollution monitoring”, in Proceedings of the 3rd UK e-Science All Hands Meeting (2004) 8.
8. J. K. Hart and K. Martinez, „Environmental Sensor Networks: a revolution in the earth System Science?”, Earth-Science Reviews, vol. 78, no. 3-4, (2006) 177-191.
9. T. Uhl and A. Hinc, “Rozproszone systemy monitoringu w diagnostyce maszyn”, Diagnostyka, vol. 27, (2002) 1-7.
10. D.L. Mills, D. Delaware, J. Martin, “RFC 5905 – Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification, 2010, <https://tools.ietf.org/html/rfc5905#page-12>.
11. RFC 1305 “Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis”, <http://tools.ietf.org/html/rfc130>.
12. A. Shinton, „How does NTP work?”, Time Tools, 2012, <http://www.timetoolsglobal.com/2012/02/03/how-does-ntp-work-1>.

Cele projektu:

Celem projektu jest opracowanie modelu innowacyjnego systemu monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych oraz wykrywania obecności pracowników w strefach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i niebezpiecznymi.

Celem etapu nr II było opracowanie systemu synchronizacji danych z czujników i modułów lokalizujących pracownika oraz opracowanie oprogramowania do pomiaru i analizy danych z czujników gazów, nacisku, położenia.

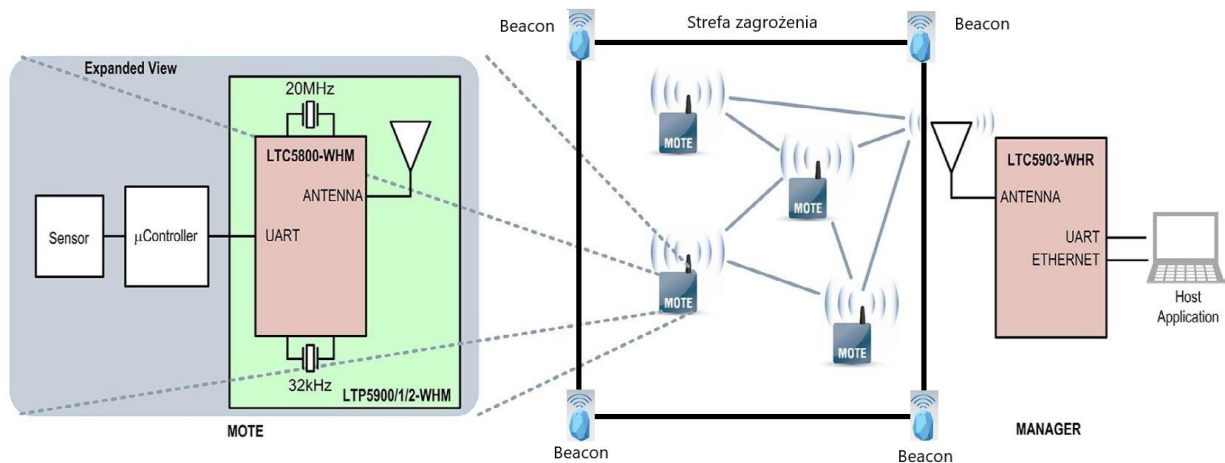
Opis wykonanych prac

Koncepcja systemu

Rysunek 1 przedstawia koncepcję systemu. System ma budowę modułową co umożliwia konfigurację systemu uwzględniając wymogi klienta.

Moduł pomiarowy

Podstawowym elementem systemu jest moduł pomiarowy – sensor. Moduł pomiarowy zajmuje się zbieraniem informacji z obszaru docelowego sieci sensorowej. Sygnał jest generowany przez sensor w wielkości odpowiedniej do obserwowanego zjawiska. Następnie sygnał jest konwertowany na cyfrowy i przesyłany do modułu obliczeniowego, a tam przetwarzany. Moduł obliczeniowy składający się z mikrokontrolera bądź mikroprocesora z pamięcią odgrywa główną rolę w współpracy z innymi sensorami. Dodatkowo moduł wyposażony jest w pamięć trwałego zapisu i interfejsy. Moduł transmisyjny odbiera i przesyła informacje pomiędzy węzłami sieci sensorowych, które komunikują się ze sobą drogą bezprzewodową wykorzystując fale radiowe, podczerwień bądź inne medium optyczne. Moduł zasilania składa się głównie z baterii i jest największą słabością sieci sensorowych. W większości aplikacji sieci sensorowych nie ma możliwości wymiany bądź doładowania energii. Z tego powodu konieczne jest zaimplementowanie pewnych schematów, które pozwolą oszczędzać energię wydłużając działanie sieci. Należy zaznaczyć, iż obecnie prowadzone są prace nad uzyskiwaniem dodatkowej energii dla sensora z energii słonecznej i wibracji (sensory IoT). System operacyjny, który zarządza i monitoruje wszystkie w/w moduły, jest centralną częścią sensora. Musi sprawnie zarządzać, monitorować i przekazywać dane pomiędzy poszczególnymi modułami. Ze względu na ograniczone zasoby sprzętowe i różne wykorzystanie aplikacyjne sieci sensorowych powinien być także dobrze adoptowalny do potrzeb.



Rys. 1 Koncepcja systemu.

Wyznaczanie strefy zagrożenia i lokalizacja pracownika

Istniejące systemy lokalizacji korzystają z różnych sposobów określania położenia, bazując na informacji o punktach odniesienia oraz na:

- pomiarach odległości – jest to najczęściej stosowana technika określania położenia obiektu, wykorzystuje metodę trilateracji (tak jak GPS), w której wymagana jest znajomość minimum trzech odległości;
- pomiarach kątów – a do określania położenia obiektu wykorzystuje metodę triangulacji, w której wymagana jest znajomość minimum trzech kątów;
- pomiarach jednej odległości i dwóch kątów – stosowane w tachimetrach śledzących;
- pomiarze mocy sygnału – punkty odniesienia wysyłają sygnał (najczęściej drogą radiową lub w podczerwieni) a położenie obiektu jest określane poprzez pomiar mocy odebranego sygnału.

W opracowanym systemie zastosowano ostatni sposób lokalizacji tj. poprzez pomiar mocy sygnału. Zastosowano moduły nRF9160 które przeznaczone są do zastosowań w Internecie Rzeczy. Na ich bazie opracowano układy sygnalizujące granice stref niebezpiecznych (tzw. beacons). Granice te mogą być ustawione na sztywno poprzez przypisanie konkretnych beaconów do granicy strefy lub strefa ta może być określana dynamicznie na podstawie pomiarów z sieci czujników. Pracownik wyposażony w urządzenie, które odbiera sygnały z rozmieszczonych beaconów i przekazuje je jednostki centralnej. Na tej podstawie możliwe jest określenie położenia pracownika i jeśli znajduje się w strefie niebezpiecznej, system wysyła mu odpowiednie ostrzeżenie.

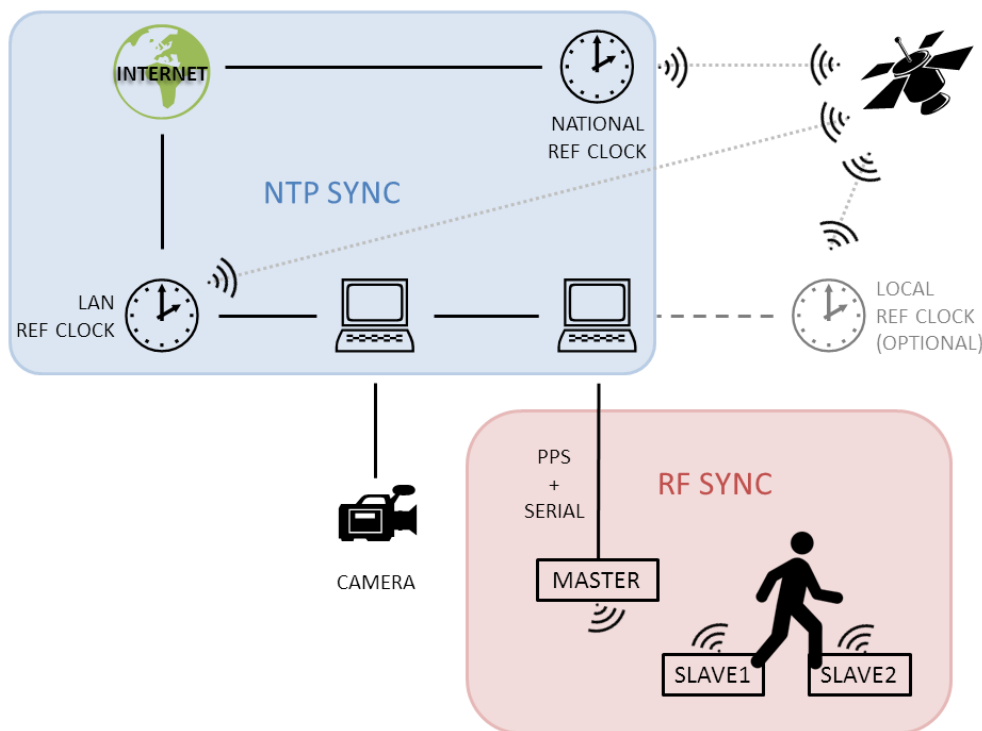
System synchronizacji danych

Synchronizacja danych w systemach rozproszonych, polega na zapewnieniu tej samej podstawy czasu wszystkim elementom systemu. Cel ten osiąga się zazwyczaj współdzieląc sygnały zegarowe oraz wyzwalające. Często w rozbudowanych systemach pomiarowych jednym z podstawowych wymagań jest możliwość skorelowania oraz analizy wszystkich zebranych danych. Brak mechanizmu synchronizacji uniemożliwia określenie, czy dwie analizowane próbki zostały pobrane równolegle. W przypadku badań odpowiedzi układu na wymuszenia, bez synchronizacji nie da się określić relacji między konkretnymi wymuszeniami i odpowiedziami. Zatem, istotnym problemem badawczym jest opracowanie skutecznych metod synchronizacji i obróbki danych uzyskiwanych z różnych urządzeń pomiarowych

W tym celu, w ramach etapu II opracowano system synchronizacji danych z czujników i modułów lokalizujących pracownika. Na rys. 1 przedstawiono schemat koncepcyjny opracowywanego systemu monitorowania ruchu człowieka. Z uwagi na fakt, że docelowo planowane jest zastosowanie całego szeregu różnych czujników, założono, że system musi umożliwiać zsynchronizowanie różnych systemów pomiarowych, w szczególności:

- Opartych na komputerach PC z systemem Windows
- Opartych na sterownikach mikroprocesorowych z systemem LINUX i komunikacją Wi-Fi
- Opartych na mikroprocesorach z rodziny NRF51/52 z wbudowanym interfejsem radiowym 2,4GHz.

Pierwsza i druga grupa urządzeń jest istotna z uwagi na możliwość obsługi urządzeń takich jak kamery z oprogramowaniem do śledzenia ruchu oraz. Z kolei ostatnia grupa urządzeń jest interesująca z uwagi na niewielkie rozmiary, co umożliwia realizację systemu jednoczesnej rejestracji nacisku obydwu stóp na podłoże oraz położenia ciała przy użyciu akcelerometru. Założono, że system powinien mieć możliwość synchronizacji pomiarów z 3 urządzeń częstotliwościami do 64Hz (odstęp między próbkami około 16ms) przy błędzie synchronizacji poniżej 1/3 okresu próbkowania czyli 5ms. Ponadto system powinien umożliwić przesyłanie danych w formacie 8 kanałów x 16 bitów x 64Hz z trzech urządzeń jednocześnie (dwie wkładki do butów + akcelerometr).



Rys. 1. Schemat systemu synchronizacji i pomiarów.

Realizacja systemu synchronizacji zegarów wymaga posiadania dokładnego zegara wzorcowego. Zdecydowano o zastosowaniu w tej roli odbiornika GPS u-blox NEO-6M. Odbiornik ten generuje sygnał PPS (Pulse-Per-Second). Jest to sygnał TTL o okresie 1s i szerokości 100ms, w którym zbocze narastające odpowiada początkowi sekundy według czasu GPS. Odbiornik ten podłączony został do komputera Raspberry PI, pracującego w roli serwera NTP (Network Time Protocol). Oprogramowanie NTP umożliwia synchronizację zegara lokalnego komputera ze źródłem sygnału PPS, bądź też innym komputerem (komputerami) wyposażonymi w oprogramowanie NTP. Rozwiązanie takie umożliwia zsynchronizowanie zegarów wielu komputerów w sieci lokalnej do jednego źródła wzorcowego (odbiornika GPS). Błąd zegara serwera NTP w stosunku do sygnału GPS nie przekracza 6 μ s. Pozostałe komputery w systemie synchronizowane są do serwera NTP przez sieć Ethernet lub Wi-Fi. Błąd zegara komputera PC z systemem Windows 7, natychmiast po uruchomieniu systemu wynosi kilka ms, a po około 4h pracy spada poniżej 1ms. Osiągnięcie dokładności synchronizacji lepszej niż 1ms jest możliwe pod warunkiem zapewnienia 24-godzinnego okresu stabilizacji systemu. System do bezprzewodowego pomiaru z czujników nacisku, gazów, tętna, temperatury zrealizowany został w oparciu o układ scalony NRF51822. Układ ten zawiera 32-bitowy procesor ARM Cortex M0, radio pracujące na częstotliwości 2,4GHz z prędkością 0.25, 1 lub 2Mbit/s, oraz 10-bitowy, 8-kanałowy przetwornik A/C. Oprogramowanie procesora zostało napisane w środowisku Keil uVision z wykorzystaniem systemu operacyjnego czasu rzeczywistego RTX CMSIS-RTOS. Układ NRF51822 wyposażony jest w dwa oscylatory kwarcowe. Pierwszy oscylator, pracujący z częstotliwością 16MHz lub 32MHz wykorzystywany jest jako zegar taktujący procesora. Drugi oscylator, pracujący z częstotliwością 32768Hz wykorzystywany jest jako energooszczędny zegar czasu rzeczywistego. Jako podstawową jednostkę czasu przyjęto 32 okresy zegara 32768Hz, co odpowiada zegarowi o częstotliwości 1024Hz, czyli okresie 0,977ms. Próbkowanie sygnału wejściowego co 16 tyknień wyżej wymienionego zegara daje częstotliwość próbkowania 64Hz. Czas

pobrania każdej próbki zapisywany jest jako liczba tyknięć zegara od północy, co umożliwia zapisanie znacznika czasu o rozdzielczości 0.977ms jako liczby 32-bitowej. Na urządzeniu centralnym jako główny zegar stosowany jest oscylator 16 lub 32MHz. Zegar ten stosowany jest do precyzyjnego pomiaru czasu dla realizacji programowej pętli stałej fazy (PLL). Sygnał PPS z komputera lub odbiornika GPS wykorzystywany jest do synchronizacji PLL pracującej z częstotliwością 1024Hz, w taki sposób, aby zbocze narastające sygnału wyjściowego pętli PLL było zsynchronizowane ze zboczem narastającym sygnału PPS. Zastosowanie pętli PLL umożliwia korekcję błędów wprowadzonych przez niestabilność zegara komputera pracującego jako lokalne źródło sygnału PPS. Z kolei na urządzeniu podrzędnym jako źródło czasu stosowany jest zegar 32768Hz z dzielnikiem 32 (czyli 1024Hz), ponieważ oscylator 16/32MHz jest wyłączany pomiędzy pomiarami w celu zmniejszenia zużycia energii.

Opracowany protokół synchronizacji czasu opiera się na obserwacji, że w protokole GZLL wymiana informacji pomiędzy urządzeniami musi zakończyć się w trakcie jednej szczeliny czasowej. Z ustaloną częstotliwością (typowo 1 sekunda), urządzenie podrzędne (slave) wysyła do urządzenia nadrzędnego (master) ramkę SYNC, umieszczając w polu TIMESTAMP wartość zegara pobraną bezpośrednio przed wysłaniem ramki. Transmisja potwierdzana jest przez urządzenie nadrzędne w ramach tej samej szczeliny czasowej ramką SYNC_ACK. Przed wysłaniem potwierdzenia stos GZLL w urządzeniu nadrzędnym informuje aplikację o odebraniu danych poprzez wywołanie funkcji `nrf_gzll_host_rx_data_ready()`. Z kolei na urządzeniu podrzędnym odebranie ramki SYNC_ACK powoduje wywołanie funkcji `nrf_gzll_device_tx_success()`. Jeżeli czas trwania szczeliny czasowej jest mniejszy od 0,977ms (protokół dopuszcza wartości od 0,6ms wzwyż) można bezpiecznie założyć, że opóźnienie pomiędzy wywołaniem funkcji `nrf_gzll_host_rx_data_ready()` na urządzeniu nadrzędnym oraz `nrf_gzll_device_tx_success()` na urządzeniu podrzędnym nie przekracza jednego okresu zegara 1024Hz. Co za tym idzie, obydwa urządzenia mogą wykorzystać te wywołania funkcji do odczytu stanu własnego zegara 1024Hz. Urządzenie podrzędne przesyła stan zegara odczytany podczas ostatniego zdarzenia synchronizacji w polu LAST_TIMESTAMP kolejnej ramki SYNC. Porównanie wartości LAST_TIMESTAMP ostatniej ramki oraz TIMESTAMP poprzedniej ramki umożliwia urządzeniu nadrzędnemu weryfikację poprawności działania protokołu synchronizacji – wartości te powinny być zgodne z dokładnością do 1 okresu zegara. Urządzenie nadrzędne, dysponując wskazaniami własnego zegara (zsynchronizowanego do GPS) odpowiadającymi wskazaniom zegara urządzenia podrzędnego, może wyliczyć różnicę wskazań własnego zegara i zegara urządzenia podrzędnego. W celu zsynchronizowania akwizycji danych, urządzenie nadrzędne wysyła do urządzenia podrzędnego ramkę typu COMMAND z poleceniem rozpoczęcia pomiarów, gdzie w polu TIMESTAMP umieszcza przyszłe wskazanie zegara lokalnego urządzenia podrzędnego odpowiadające pożądanemu momentowi rozpoczęcia akwizycji danych, np. początkowi następnego sekundy według czasu GPS. Ponieważ protokół powtarzany jest co sekundę, dryft zegara urządzenia podrzędnego jest korygowany na bieżąco. Z uwagi na działanie protokołu GZLL, ramki COMMAND przesyłane są wraz z potwierdzeniami ramek typu SYNC lub DATA.

Niezależnie od protokołu synchronizacji, dane pomiarowe przesyłane są do urządzenia nadrzędnego w ramach DATA. Każda ramka zawiera 8 16-bitowych pól danych ADC[n], wykorzystywanych do przesłania stanu 8-kanałów 16-bitowego przetwornika A/C. Dodatkowo, każda ramka zawiera numer sekwencyjny SEQ oraz wskazanie zegara w momencie rozpoczęcia pomiaru (TIMESTAMP). Dodatkowe pole COOKIE zawiera wartość uprzednio przesłaną przez urządzenie nadrzędne w ramce COMMAND. Umożliwia to urządzeniu nadrzędnemu odrzucenie ramek z danymi które zostały wysłane przed zakończeniem synchronizacji zegarów. Jak wynika z zasady działania protokołu GZLL, transmisja każdej ramki typu DATA musi zostać potwierdzona przez odbiornik, jeśli to nie nastąpi, podejmowana jest próba retransmisji.

Przykłady działania oprogramowania do akwizycji i analizy danych

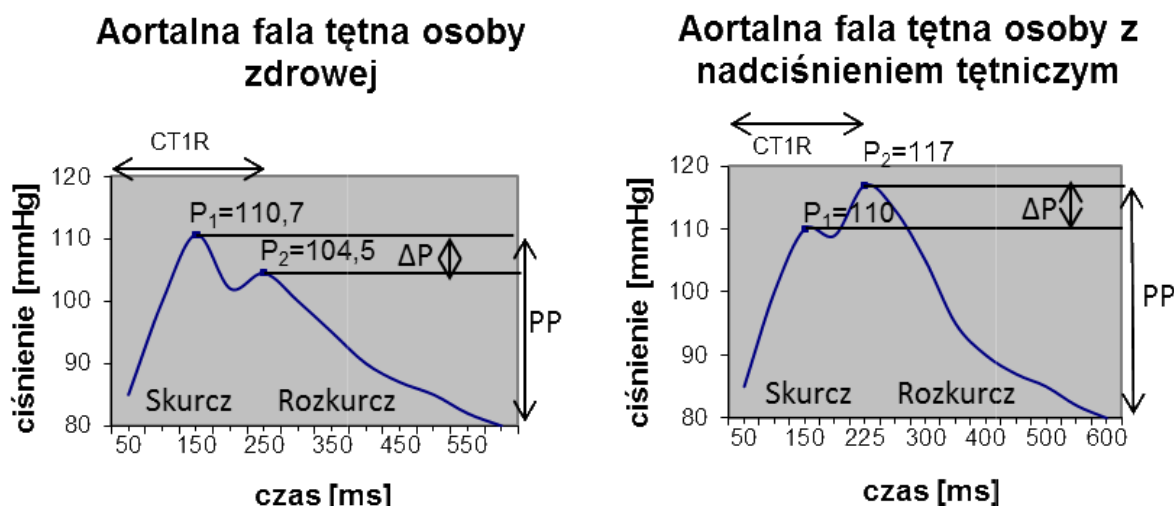
System do pomiaru fali tętna

Przykładowe dane pomiarowe z piezoelektrycznych czujników tętna pokazano na rys. 2. Celem prowadzonych prac w ramach tematu było opracowanie nowego sposobu pomiaru tętna i ciśnienia w sposób bezinwazyjny i ciągły. Jest on oparty na rejestracji fali tętna w dwóch niezależnych punktach pomiarowych przez czujniki piezoelektryczne, które docelowo będą zintegrowane np. z rękawicą roboczą pracownika.

Pomiar prędkości fali tętna (PWV - pulse wave velocity) jest wykorzystywany do oceny sztywności ścian tętnic oraz pomiaru tętna i ciśnienia krwi. Prędkość PWV jest obliczana jako iloraz odległości którą przebywa fala tętna pomiędzy miejscami pomiaru, a czasem propagacji fali (PTT pulse transit time). Falę tętna w naczyniach wykrywa się np. metodą ultrasonograficzną, dostępną dla lekarzy profesjonalistów. Do obliczeń przyjmuje się że drogą przebytą przez falę pulsu jest odległość między czujnikami fali ciśnienia (np. pozycjami głowic ultradźwiękowych), a czasem propagacji - czas jaki upływa pomiędzy pojawieniem się fali pulsu w tętnicy szyjnej, a momentem jej pojawienia się w tętnicy udowej. W metodzie klasycznej pomiary te przeprowadzano w warunkach stacjonarnych - pacjent leżący nieruchomo, a urządzenia pomiarowe są umieszczone stacjonarnie na stanowisku obok badanego i obsługiwane w trakcie badania przez odpowiednio przeszkolony personel.

Systematyczne badanie prędkości fali tętna w warunkach środowiska pracy może być wykorzystywane do oceny bieżących zmian sztywności tętnic, jako jednego z czynników oceny pogorszenia się stanu zdrowia jak również do ciągłego pomiaru zmian ciśnienia krwi i tętna, gdyż zmiany ciśnienia krwi są proporcjonalne do zmian tego parametru.

Pomiar fali tętna, ciśnienia krwi czy tętna na stanowisku pracy powinien być wykonany precyzyjnie, w sposób automatyczny, bez udziału osób postronnych i z względnie niewielkim, możliwym do zaakceptowania, udziałem samej osoby badanej. Pomiar powyższych parametrów umożliwi doraźną kontrolę stanu pracownika (zmęczenie, arytmia) zaś zestawienie pomiarów z dłuższego okresu czasu umożliwi wstępną diagnozę chorób układu krążenia, które mogą być wynikiem oddziaływania określonych czynników na stanowisku pracy: temperatura, wysiłek, opary substancji, stres. Rys. 2 przedstawia porównanie aortalnej fali tętna osoby zdrowej i osoby z nadciśnieniem tętniczym.



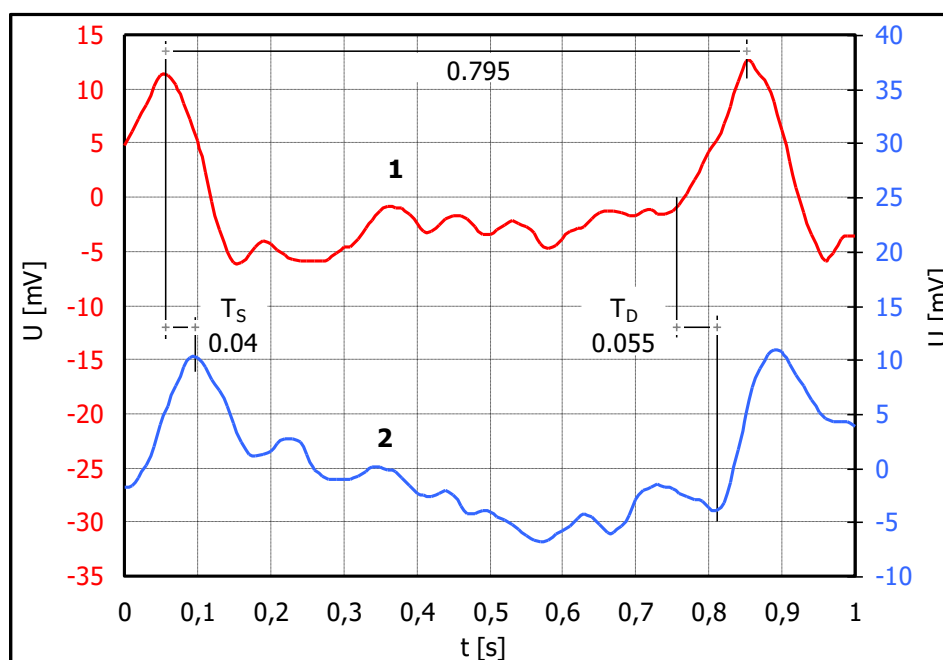
Rys. 2 przedstawia porównanie aortalnej fali tętna osoby zdrowej i osoby z nadciśnieniem tętniczym.

Ponieważ oba czujniki będą rejestrować mechaniczną akcję serca, pomiary te będą pozbawione efektu PEP (pre-ejection-period) jaki występował w dotychczasowych zastosowaniach, gdy do pomiaru PTT zestawiano ze sobą dwa przebiegi, elektryczny EKG i mechaniczny PPG (photoplethysmography). W przeprowadzonych badaniach zastosowano czujniki na bazie piezoelektrycznej folii z polifluorku winylidenu PVDF. Badania potwierdziły możliwość wyznaczenia przesunięcia czasowego. Czujniki umieszczone były na nadgarstku i na palcu. Rejestrację tętna przeprowadzano równocześnie w tych dwóch punktach pomiarowych. Rozmieszczenie czujników przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3 Rozmieszczenie czujników do pomiaru fali tętna.

Przebieg fali tętna na nadgarstku i na palcu oraz przesunięcie czasowe pomiędzy tymi punktami dla ciśnienia skurczowego i rozkurczowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4 Przebieg fali tętna oraz przesunięcie czasowe pomiędzy tymi punktami dla ciśnienia skurczowego i rozkurczowego, 1 – na nadgarstku, 2 – na palcu.

Przesunięcie czasowe, różne dla tych dwóch punktów pomiarowych wynika z różnego kształtu impulsów dla tych dwóch miejsc pomiarowych.

Różnica czasowa dla sygnału skurczowego T_S wynosi 0.04s a dla sygnału rozkurczowego T_D 0.055s. Czas pomiędzy dwoma pikami dla ciśnienia skurczowego wynosi 0.795 s, stąd częstotliwość pulsacji wynosi $60 \text{ s} / 0.795 \text{ s} = 75.47$. Oprogramowanie w tym przypadku umożliwia kontrolę tętna człowieka. Głębsza analiza przebiegów umożliwia również określenie zmian ciśnienia krwi. Powyższy system po wstępnej analizie czystości patentowej zostanie zgłoszony do Urzędu Patentowego RP.

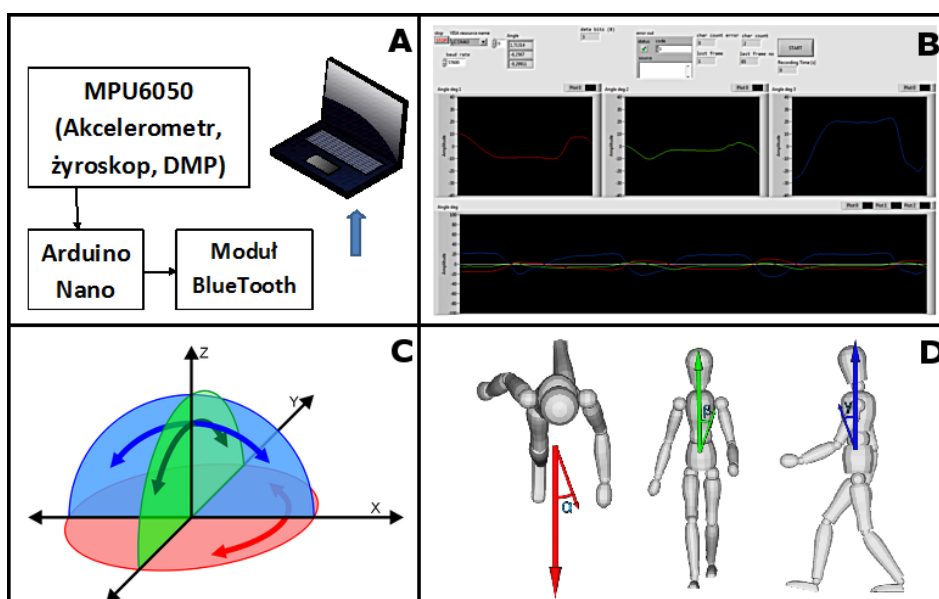
System do określania położenia pracownika i trajektorii ruchu

Czujniki jakie zastosowano do pomiaru położenia środka ciężkości ciała to akcelerometr i żyroskop. Akcelerometr pozwala określić położenie urządzenia, natomiast żyroskop pozwala dodatkowo śledzić zmiany położenia względem osi X, Y i Z. W układzie prototypowym do pomiaru orientacji w przestrzeni wykorzystano mikroukład elektromechaniczny (MEMS) typu MPU6050

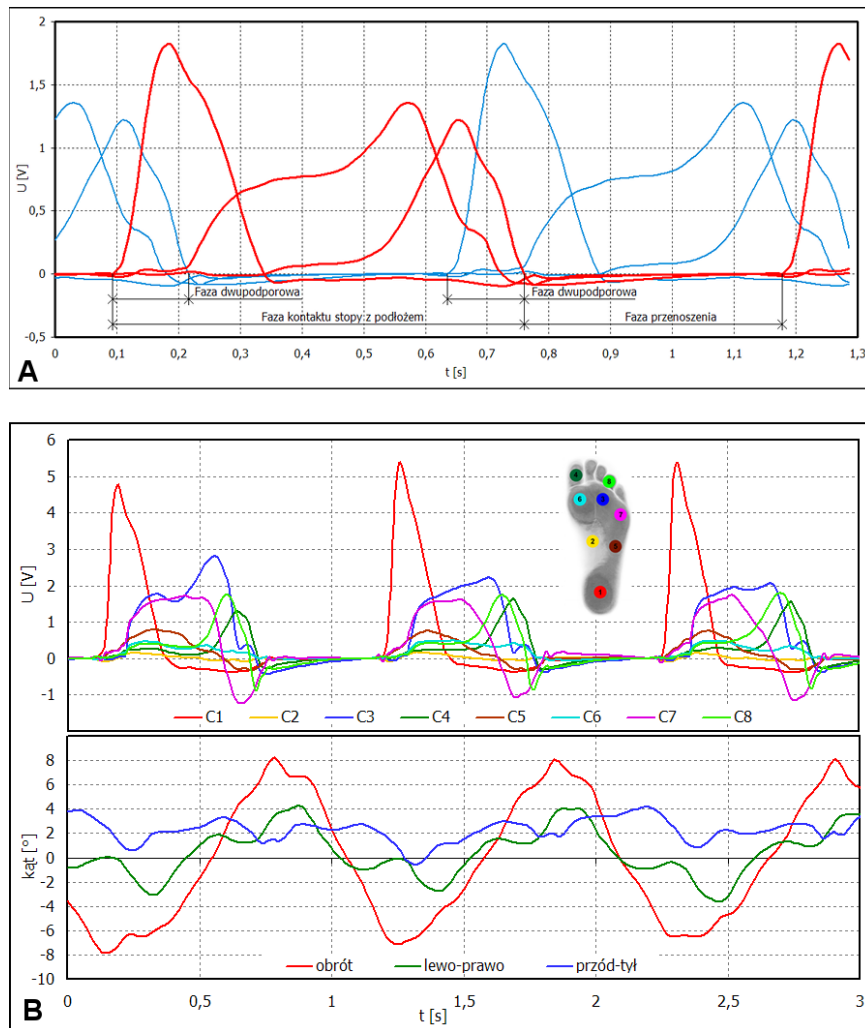
zawierający w jednej obudowie akcelerometr, żyroskop oraz DMP (Digital Motion Procesor). Ostatni element jest ogromną zaletą tego układu, stawiając go ponad innymi inercyjnymi układami pomiarowymi. Dzięki oprogramowaniu dostarczonemu przez producenta, DMP wykonuje wszelkie obliczenia określające położenie w przestrzeni odciążając w ten sposób procesor systemowy urządzenia. Kolejną zaletą tego rozwiązania jest równoczesne odczytywanie i przetwarzanie danych z akcelerometru i żyroskopu co minimalizuje błędy wynikające z opóźnień pomiędzy odczytami poszczególnych wartości. Skorelowane i częściowo przetworzone dane w postaci kwaternionów są następnie przekazywane do płytki Arduino poprzez magistralę I2C w ilości 100 próbek na sekundę. Odebrane wyniki są przeliczane przez Arduino z kwaternionów na trzy wartości kątowe:

- kierunek ruchu
- przechylenie lewo-prawo
- przechylenie przód-tył

Powyższe wyniki przesyłane są następnie poprzez moduł Bluetooth do komputera gdzie mogą zostać zwizualizowane i zapisane celem dalszej obróbki. Program do wizualizacji na bieżąco oraz zapisu w formacie CSV(Comma Separated Values) został stworzony w środowisku LabView. Schemat urządzenia, okno programu, zobrazowanie wyznaczanych kątów w określonych płaszczyznach i ruchu człowieka przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5 Schemat urządzenia – A, Okno programu – B, wyznaczone kąty w określonych płaszczyznach – C, wyznaczone kąty ruchu człowieka – D.



Rys. 6 Przebiegi sygnałów siły nacisku stopy z 3 czujników (pięta, środkowy czujnik śródstopia, duży palec) A- dla dwóch stóp równocześnie. B – synchronizacja przebiegu dla jednej stopy z położeniem środka ciężkości.

Z danych zamieszczonych na rys. 6 A możemy obliczyć że czas zetknięcia stopy z podłożem wynosi ~ 61% a faza przenoszenia ~ 39 % czasu trwania kroku, co jest zgodne z danymi literaturowymi (~ 60% i ~ 40%). Czas gdy dwie stopy są na podłożu wynosi ~ 11 %.

Z przebiegu sygnału nacisku stopy i sygnału położenia pracownika przedstawionego na rys. 6 B, przy chodzeniu normalnym, widzimy że:

- największą wartość kątową uzyskujemy dla obrotu ciała,
- wartości uzyskane dla przechylenia w prawo w lewo i pochylenia do przodu mają wartości zbliżone,
- można przyjąć że nie ma odchylenia środka ciężkości do tyłu
- ciało przechyliło się na prawo lub lewo zgodnie ze stawianą stopą – prawa, lewa.

Inne zachowanie się położenia ciała od przedstawionego powyżej, będzie wskazywało na nieprawidłowości w funkcjonowaniu pracownika na stanowisku pracy. Powyższy system umożliwia śledzenie trajektorii przemieszczania się pracownika a także analizę ergonomii podczas wykonywania czynności na stanowisku pracy, co może ograniczyć liczbę wypadków przy pracy, ewentualnie ograniczyć ryzyko eskalacji choroby zawodowej związanej z nieprawidłowym wykonywaniem czynności na stanowisku pracy.

Wnioski

Połączenie rejestracji i wizualizacji nacisku stopy na podłoże z położeniem środka ciężkości ciała w badaniach dynamicznych, poza laboratorium, rozszerza możliwość oceny poprawności ruchu człowieka nie tylko pod względem jakościowym ale też ilościowym

(aktimetria). Połączenie tych dwóch pomiarów umożliwia wykonanie systemu ostrzegającego człowieka przed upadkiem, co planowane jest w dalszych pracach.

Załącznik 1 – publikacja przyjęta do druku w Przeglądzie Elektrotechnicznym.

Załącznik 2 – Prezentacja konferencyjna