

## Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia nowe metody rozpoznawania gestów 3D bez użycia kamer, w aplikacjach w branży motoryzacyjnej. W ramach realizacji pracy, dokonano przeglądu literatury oraz istniejących rozwiązań, które mogłyby zostać zastosowane do rozpoznawania gestów w środowisku wnętrza pojazdu. Następnie przeanalizowano istniejące systemy w następujących kategoriach: Systemy wizyjne, Systemy wykorzystujące elektrody pojemnościowe, Systemy oparte o czujniki podczerwieni, Systemy radarowe, Systemy ultradźwiękowe, Systemy zlokalizowane na ręce. Każdą z zaproponowanych technologii poddano krytycznej analizie z perspektywy wymagań dla systemów do rozpoznawania gestów z potencjalnym zastosowaniem w branży samochodowej. Dodatkowo, każdą z nich przeanalizowano pod kątem wykorzystania do utworzenia nowego rozwiązania wykluczając z założenia systemy wizyjne. Na zakończenie przeglądu literatury omówiono fuzję danych oraz klasyfikację metod wykorzystywanych do jej przeprowadzania. W rozdziałach „System do rozpoznawania gestów oparty o czujniki pojemnościowe” oraz „System do rozpoznawania gestów oparty o radar”, przedstawiono autorskie rozwiązania, w tym zastosowaną architekturę sprzętową, opracowane algorytmy oraz sposoby działania obu systemów. Rozwiązania te zostały stworzone w ramach realizacji projektu wdrożeniowego w firmie Merit. W rozdziale traktującym o systemie pojemnościowym zaproponowano również sposoby rozszerzania danych uczących dla przebiegów sygnału pojemnościowego z poszczególnych elektrod. W końcowej części rozdziału opisano proces konwersji modelu sieci neuronowej oraz uruchomienia go na mikrokontrolerze. W kolejnym podrozdziale opisana została implementacja systemu działającego w oparciu o czujniki pojemnościowe, który został zamontowany w samochodzie testowym, co stanowiło wdrożeniowy charakter pracy. Na zakończenie rozdziału, przedstawiono nowatorską metodę automatyzacji akwizycji danych uczących dla potrzeb procesu treningu sieci neuronowej przy użyciu 4 osiowego manipulatora, który zastąpił ludzi wykonujących gesty. W rozdziale dotyczącym systemu używającego radaru fali ciągłej z modulacją częstotliwościową, oprócz opisu konstrukcji radaru oraz jego sprzętowej konfiguracji, przedstawiono zastosowane metody przetwarzania danych otrzymywanych bezpośrednio z radaru do postaci cech, które stanowiły wejście do sieci neuronowej klasyfikującej gesty. W ostatnim rozdziale zostały przedstawione wyniki skuteczności rozpoznawania gestów dla obu opisanych rozwiązań, a także po dokonaniu fuzji danych pochodzących z każdego z nich. Sieć neuronowa wykorzystana do syntezy danych, przyjmowała rozszerzony wektor wejściowy obejmujący 10 cech w postaci 5 sygnałów z czujnika pojemnościowego, 2 przebiegów określających prędkość obiektu względem anten radaru,

2 przebiegów informujących o odległości wykrywanego obiektu od każdej z anten oraz położenia kątownego wykrywanego obiektu w płaszczyźnie wertykalnej radaru. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że modele sieci neuronowej rozpoznające zarówno 5 oraz 7 gestów, dzięki zastosowaniu fuzji danych, osiągnęły ponad 97 procentową skuteczność ich rozpoznawania, podczas gdy sieci neuronowe wykorzystujące dane tylko z jednego typu sensora (elektrod pojemnościowych i radaru) odpowiednio dla 5 gestów 93% i 94,2% oraz dla 7 gestów 87,8% i 92,5%. Otrzymane rezultaty dowiodły postawionej tezie, że fuzja danych z obu systemów spowoduje wzrost skuteczności wykrywanych gestów. W ostatnim rozdziale przedstawiono obszary, których udoskonalenie powinno zostać rozważone pod kątem dalszego rozwoju przedstawionych systemów, zarówno w kontekście wykorzystania osobno jak i w kontekście ich fuzji.

26.06.2023 r.

Piotr Benda

## Abstract

This doctoral thesis presents new methods for 3D gestures recognition without using cameras in automotive industry applications. As part of the work, literature and existing solutions were researched on the areas of potential application in car interior environment. Subsequently, previously existing systems were analysed and divided into following categories: Visual systems, Capacitive electrodes systems, Infrared sensors systems, Radar systems, Ultrasonic systems, Systems mounted on hand. All proposed technologies were subjected to analysis from the perspective of system requirements for gesture recognition and potential application in automotive industry. Additionally, all of them were investigated in terms of using them as a new solution excluding visual systems due to thesis assumption. At the end of the literature review, there is the chapter explaining data fusion term and classification of methods used for its execution. Chapters "System for gesture recognition based on capacitive sensors" and "System for gesture recognition based on radar" present authorial solutions, including applied hardware architecture, developed algorithms and principles of operations for both systems. These solutions were created as part of implementation doctorate program in cooperation with Merit Poland company. In the chapter dealing with Capacitive system, there were proposed techniques for augmentation of data for signals received from each capacitive electrode. The final part of the chapter describes process of the model conversion and its execution on microcontroller. In the next subchapter, implementation of the capacitive system in the test car was presented, as a part of implementational characteristics of the work. At the end of the chapter, the novel method to collect data for neural network model training process was presented. The method assumes using a 4-axis robotic arm manipulator, which replaced people in performing gestures. In the chapter dealing with the system using frequency modulated continuous wave (FMCW) radar, despite of description of the radar structure and its hardware configuration, methods of processing a raw data received directly from the radar to the features was presented. These features constituted input to the neural network, which classified gestures. In the chapter "Data fusion for capacitive and radar systems", the results of gesture recognition accuracy for both solutions were presented. Additionally, accuracy after fusing data from the two systems was exposed. The neural network used for data synthesis, received an extended input vector including ten features. For the first five features' signals were obtained from the capacitive sensor. The next five features were gained from the radar sensor. That was two waveforms representing speed of the object referring to each of antennas, two waveforms representing range of the object from antennas, and the

last waveform reflecting angular position of the object in a vertical plane. Executed experiments demonstrated that, applying data fusion in neural network models recognizing 5 and 7 different gestures, resulted with over 97% accuracy of gestures recognition. Whereas neural networks using data from one type of sensor (capacitive and radar) resulted with the accuracy 93 and 94,2 % for 5 gestures and 87,8 and 92,5% for 7 gestures. The results have proven the assessment, that fusion on the data from both systems will cause increase of the gesture recognition accuracy. In the last chapter, areas for improvement and further investigations were highlighted within the context of data fusion and operation of systems separately.

26.06.2023v.

Piotr Kowal