

Igor OSTROWSKI<sup>1</sup>, Karol MAJEK<sup>1</sup>, Artur ADAMEK<sup>2</sup>, Paweł MUSIALIK<sup>1</sup>,  
Janusz BĘDKOWSKI<sup>1</sup>, Andrzej MASŁOWSKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI  
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

<sup>2</sup> POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ GEODEZJI I KARTOGRAFII  
ul. Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa

## Mobilny system tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej

Mgr Igor OSTROWSKI

Absolwent Uniwersytetu Opolskiego, oraz podyplomowych studiów „Mechatronika w Edukacji”. Nauczyciel mianowany. Doktorant na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Mechatroniki. Wśród jego zainteresowań naukowych znajdują się urządzenia wykonawcze automatyki i robotyki oraz zastosowania technologii cloud computingu w robotyce mobilnej.



Mgr inż. Paweł MUSIALIK

Asystent i doktorant w Instytucie Automatyki i Robotyki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. W 2009 obronił pracę magisterską z dziedziny automatyki i robotyki, zdobywając tytuł magistra inżyniera. Prowadzi działalność naukową w zakresie robotyki mobilnej. Aktualne badania koncentrują się na reprezentacji semantycznej środowiska pracy robota.



e-mail: [p.musialik@mchtr.pw.edu.pl](mailto:p.musialik@mchtr.pw.edu.pl)

Karol MAJEK

Absolwent Technikum Elektronicznego, student trzeciego roku Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej specjalności Robotyka. Zajmuje się programowaniem równoległym w technologii CUDA, robotyką mobilną oraz tworzeniem systemów Augmented Reality.



e-mail: [karolmajek@gmail.com](mailto:karolmajek@gmail.com)

Dr inż. Janusz BĘDKOWSKI

Stopień doktora nauk technicznych w Automatyce i Robotyce w 2010r. Zatrudnienie na etacie adiunkta w Instytucie Automatyki i Robotyki, Politechnice Warszawskiej. Zakres prac badawczych: mobilne systemy inspekcyjno-interwencyjne, modele semantyczne w robotyce mobilnej, 6D-SLAM, obliczenia równoległe, trening operatorów robotów mobilnych.



e-mail: [januszbedkowski@gmail.com](mailto:januszbedkowski@gmail.com)

Dr inż. Artur ADAMEK

Jest asystentem w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów przemysłowych na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, ukończył studia magisterskie i doktoranckie na tym samym Wydziale. W Zakładzie Geodezji Inżynierskiej pracuje od 2010 roku. Specjalizuje się w zastosowaniu technik skanowania laserowego w specjalistycznych pomiarach geodezyjnych, badaniach deformacji oraz w mobilnych systemach pomiarowych. Specjalista w zakresie geodezyjnych pomiarach polarnych.



Prof. dr hab. inż. Andrzej MASŁOWSKI

Profesor zwyczajny Automatyki i Robotyki, zatrudniony na etacie profesora w Instytucie Automatyki i Robotyki, Politechnice Warszawskiej. Członek IFIP, IFAC, IMACS, IMEKO TC-17 Measurement and Control in Robotics. Od 2006 reprezentant Polski w "Joint Coordinating Forum International Advanced Robotics Programme".



e-mail: [a.maslowski@mchtr.pw.edu.pl](mailto:a.maslowski@mchtr.pw.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono mobilny system tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej. Zaproponowano nową metodę filtracji oraz rejestracji danych wykorzystującą obliczenia równoległe (NVIDIA FERMI). Opracowany system informatyczny umożliwia gromadzenie danych przestrzennych z wykorzystaniem geodezyjnego systemu pomiarowego 3D oraz pozwala na etykietowanie obiektów. Tworzona mapa semantyczna jest dostępna z poziomu dowolnego urządzenia mobilnego (laptop, smartphone, tablet).

**Słowa kluczowe:** mapa semantyczna, przestrzenna dokumentacja semantyczna, skanowanie laserowe, chmura punktów, obliczenia równoległe, wizualizacja.

### Mobile system for the creation of the spatial semantic documentation

#### Abstract

In this paper a new system for creating spatial semantic documentation is shown. We define semantic documentation as a result of integrating semantic mapping with a mobile 3D geodetic scanning system and a cloud computer system. This approach is possible by using semantic mapping State of the Art [2], modern scanning techniques [3] and parallel computing [4]. The main task of the system is representing the environment with concepts of objects highlighted in it. The results are distributed in a cloud. The phases of system operation are shown in Fig. 1. Each phase is

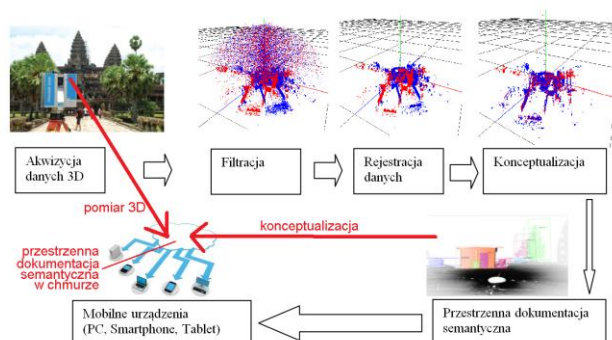
described in detail in consecutive sections of the paper. Section 1 describes the thought process behind the system and data acquisition with a ZF 5010 laser scanner. In Section 2 a CUDA(NVIDIA FERMI) enhanced scan filtration method is shown. The next step of data preparation, merging of 3D point clouds, is described in Section 3. Section 4 concentrates on manual environment conceptualization (map with object concepts is shown in Fig. 4). Semantic documentation distribution and sharing are described in Section 5. The results can be shown on any PC, tablet, smartphone or smartTV device, by using SaaS(Software as a Service) approach and Citrix system. The paper finalizes with conclusions and plans for further system development. The system is a new approach to sharing information about the environment and it may be applied i.e. in Crisis Management for coordinating complicated rescue operations, in interior design and cataloguing etc.

**Keywords:** semantic map, spatial semantic documentation, laser scanning, cloud of points, parallel computing, visualization.

### 1. Metodyka tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej

Poprzez przestrzenną dokumentację semantyczną rozumiemy moduł mapy semantycznej [1] zintegrowany z mobilnym geodezyjnym systemem pomiarowym 3D oraz rozproszonym systemem informatycznym. Mapy semantyczne już od dawna są szeroko stosowane w robotyce mobilnej [2]. Natomiast dopiero zastosowanie nowoczesnych technik skaningowych [3] oraz obliczeń

równoległych [4] umożliwia realizację proponowanego systemu. Podstawowym zadaniem przy tworzeniu przestrzennej dokumentacji semantycznej jest konceptualizacja obiektów występujących w scenie. Na tym etapie projektu zadanie konceptualizacji czyli nadawania unikalnych etykiet dla kolejnych obiektów 3D jest realizowane przez użytkownika. Zadaniem mobilnego, rozproszonego systemu informatycznego jest dostarczenie dokumentacji w trybie natychmiastowym do wszystkich węzłów systemu. Przy założeniu dostępu systemu do Internetu dokumentacja semantyczna będzie dostępna z dowolnego miejsca także z dostępem do Internetu. Schemat na rysunku 1 przedstawia ideę mobilnego systemu realizującego zadanie tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej.



Rys. 1. Metoda tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej  
Fig. 1. A method for creation of spatial semantic documentation

Akwizycja danych 3D jest realizowana z wykorzystaniem geodezyjnego systemu pomiarowego 3D, który bazuje na naziemnym skanerze fazowym Z+F model IMAGER 5010. Głównymi cechami wymienionego instrumentu, są: bardzo szybki czas pomiaru (skanowania) oraz wysoka precyzja i ilość zebranych informacji. Skaner posiada możliwość pomiaru ponad 1 mln punktów na sekundę i może wykonać scenę 360x320 stopni w rozdzielczości 0.6 mm, tworząc praktycznie quasi ciągłą powierzchnię reprezentowaną przez chmurę punktów. Powstała w wyniku pomiaru chmura punktów 3D ma zasięg do 170 metrów, a liczba punktów zależy od wybranego trybu pomiarowego (w naszym przypadku około 1,5 miliona punktów, czas pojedynczego pomiaru około 2 minut). Ze względu na właściwości systemu pomiarowego (lasera, którego długość fali znajduje się w zakresie bliskiej podczerwieni, panujące w trakcie pomiaru warunki atmosferyczne oraz sferyczny charakter pomiaru część danych jest zaszumiona. W tym celu blok *Filtracja* eliminuje powstały szum. Kolejne skany (chmury punktów 3D) są rejestrowane (blok *Rejestracja danych*) z wykorzystaniem algorytmu ICP (Iterative Closest Point). Użytkownik wykonuje konceptualizację obiektów występujących w chmurze punktów za pomocą nadania unikatowych etykiet (np.: drzew, rower, drzwi). Tak powstała *Przestrzenna dokumentacja semantyczna* jest udostępniona w niezależnej chmurze, tak aby była dostępna z poziomu dowolnego urządzenia mobilnego, uwzględniając oczywiście aspekt autoryzacji.

## 2. Stan wiedzy w zakresie zastosowania GPGPU w przetwarzaniu chmur punktów 3D

Przetwarzanie chmur punktów 3D jest znanym problemem badawczym. W pracy [6] pokazano, że algorytm rejestracji danych 3D (ICP – Iterative Closest Point) zaimplementowany z wykorzystaniem procesora GPGPU (General Purpose Graphic Processor Unit) wykonuje się 40 do 60 razy szybciej niż z wykorzystaniem CPU, przy czym autorzy przeprowadzili badania na zbiorach zawierających 33558 punktów. Istotnym usprawnieniem algorytmu ICP było zastosowanie dekompozycji przestrzeni 3D wykorzystując kd-tree [7]. Stwierdzono, że implementacja z „kd-tree” wykonuje obliczenia 25 razy szybciej na zbiorze 68229 punktów.

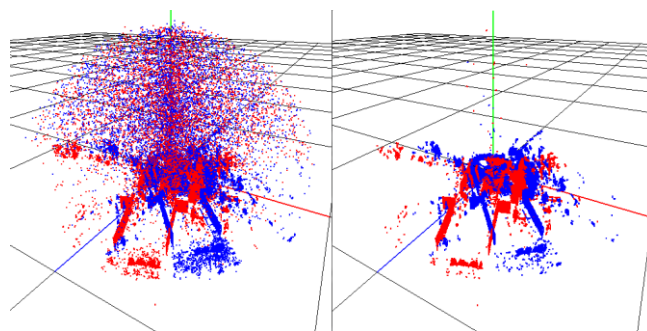
Kolejnym istotnym usprawnieniem algorytmu rejestracji danych było zastosowanie dekompozycji za pomocą „octree” [8], stwierdzone przyspieszenie wyniosło 1.34 w porównaniu do „kd-tree”. Na podstawie analizy przedstawionej w pracy [9] można stwierdzić, że zastosowanie obliczeń równoległych znacznie przyspiesza obliczenia (do 88 razy w porównaniu do klasycznej implementacji algorytmu ICP). W ramach projektu przedstawionego w tej publikacji wykorzystano autorską implementację algorytmu ICP [4], zaproponowano nową implementację filtracji chmury punktów 3D.

## 3. Filtracja chmury punktów 3D z wykorzystaniem obliczeń równoległych

W projekcie założono, że kolejność występowania punktów w pomiarze jest nieznana. W związku z tym, zaproponowaliśmy wykorzystanie dekompozycji przestrzeni 3D wykorzystując regularną siatkę o parametryzowanej liczbie koszyków [4]. Zastosowanie tej struktury danych umożliwia zliczenie najbliższych sąsiadów wokół danego punktu. Zastosowanie obliczeń równoległych sprowadziło się do opracowania funkcji jądra NVIDIA CUDA GPGPU (ang. kernel) realizującego zadanie filtracji dla wszystkich punktów w sposób równoległy. Na tym etapie implementacji możliwe jest przeprowadzenie filtracji dla zbioru złożonego z maksymalnie 64 milionów punktów 3D. Rysunek 2 przedstawia wynik działania bloku filtrującego. Algorytm filtracji chmury punktów został przedstawiony w listingu 1. Chmurę punktów można filtrować ze względu na kilka czynników, tj.: zasięg pomiaru (eliminujący punkty odległe, nie leżące w zasięgu opracowania), tzw. punkty odstające - błędne lub podwójne odbicie, bądź „ślizganie” się plamki lasera od mierzonej powierzchni, „grubość” powstałej chmury, kąt padania wiązki lasera, wartość intensywności odbicia lasera (eliminacja obiektów zbyt ciemnych lub zbyt jasnych), itp.

Listing 1:

- Algorytm 1** Filtracja chmury punktów 3D – implementacja uwzględniająca obliczenia równoległe
1. przydzielenie zasobów pamięci GPGPU
  2. skopiowanie danych(chmura punktów 3D) z pamięci RAM do pamięci GPGPU
  3. dla wszystkich punktów 3D w sposób równoległy znajdź liczbę najbliższych sąsiadów ze zbioru M
  4. jeżeli liczba najbliższych sąsiadów jest mniejsza niż zadany próg, wtedy usuń punkt ze zbioru
  5. skopiowanie danych z pamięci GPGPU do pamięci RAM
  6. zwolnienie zasobów pamięci GPGPU



Rys. 2. Wizualizacja działania bloku filtrującego z rysunku 1. Filtracja 1.5 miliona punktów w czasie około jednej sekundy z wykorzystaniem procesora GPGPU NVIDIA GeForce GT540M

Fig. 2. Visualization of the filtering block from Fig. 1. Filtration of 1.5 million points in approximately one second with the usage of GPGPU NVIDIA GeForce GT540M processor

## 4. Rejestracja danych 3D

W celu dopasowania kolejnych chmur punktów zastosowano algorytm ICP [5] z wykorzystaniem obliczeń równoległych [4] przy poszukiwaniu najbliższych sąsiadów (NNS – Nearest Neighborhood Search) oraz optymalizacją funkcji błędu za pomocą metody SVD (Singular Value Decomposition). Funkcja błędu została przedstawiona w równaniu (1).

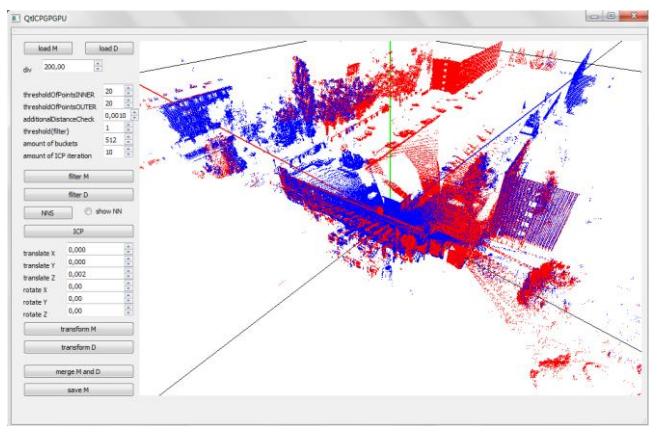
$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} w_{ij} \|\mathbf{m}_i - (\mathbf{R}\mathbf{d}_j + \mathbf{t})\|^2, \quad (1)$$

gdzie:  $E(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  - funkcja błędu,  $\mathbf{m}$  - model referencyjny,  $\mathbf{d}$  - model dopasowywany,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$  - macierze rotacji oraz przesunięcia,  $N_m$ ,  $N_d$  - liczba punktów należących do poszczególnych modeli. W wyniku rejestracji kolejnych pomiarów otrzymuje się model otoczenia, który jest wejściem do procedury konceptualizacji. Rysunek 3 przedstawia przykładowy wynik rejestracji danych. Kolorem czerwonym oznaczony jest model  $\mathbf{M}$ , kolorem niebieskim model  $\mathbf{D}$ . Z punktu widzenia użytkownika systemu możliwe jest zmodyfikowanie dowolnego parametru algorytmu GPGPU ICP w taki sposób, aby otrzymać jak najbardziej dokładne wpasowanie. Zaimplementowana metoda informuje użytkownika w sytuacji gdy kolejne iteracje ICP nie poprawiają dopasowania, co jest tożsame z osiągnięciem minimum lokalnego metody ICP. Użytkownik w tej sytuacji ocenia czy wynik jest satysfakcjonujący. Algorytm GPUICP został przedstawiony w listingu 2. Złożoność obliczeniowa algorytmu została omówiona w [4].

Listing 2:

**Algorytm 2** ICP – implementacja uwzględniająca obliczenia równoległe

1. przydzielenie zasobów pamięci GPGPU
2. skopiowanie danych z pamięci RAM do pamięci GPGPU
3. w pętli od iter = 0 do max\_iterations wykonaj
4. dla wszystkich punktów 3D ze zbioru D w sposób równoległy znajdź najbliższych sąsiadów do zbioru M
5. oblicz macierze  $\mathbf{R}$  oraz  $\mathbf{t}$  minimalizujące funkcję błędu metodą SVD
6. przekształć punkty z modelu D względem macierzy  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  i skopiuj wynik do Dt
7. skopiuj Dt do D
8. koniec pętli
9. skopiowanie danych z pamięci GPGPU do pamięci RAM
10. zwolnienie zasobów pamięci GPGPU

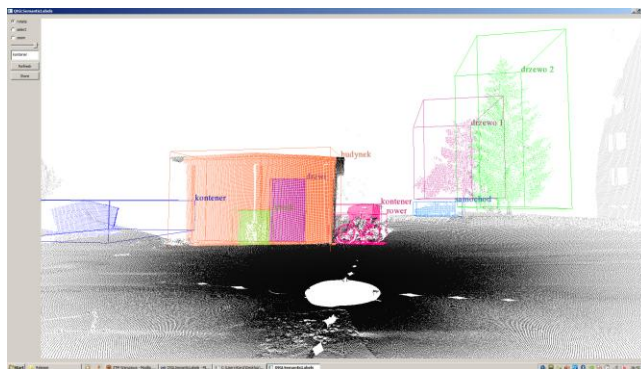


Rys. 3. Przykładowy wynik metody rejestracji danych patrząc z punktu widzenia użytkownika systemu

Fig. 3. Exemplary result of the registration method from the end user point of view

## 5. Konceptualizacja

Podstawowym elementem przestrzennej dokumentacji semantycznej jest koncept będący zbiorem punktów o tej samej etykiecie (konceptualizacja). Na tym etapie projektu klasyfikowanie obiektów jest prowadzone manualnie z wykorzystaniem oprogramowania przedstawionego na rysunku 4. Na tym konkretnym przykładzie przedstawiliśmy koncepcję naszego systemu, gdzie użytkownik ma możliwość stworzenia modelu 3D otaczającego środowiska oraz nadania etykiet (np.: kontener, drzwi, rower, drzewo) poszczególnym fragmentom modelu. Poszczególne etykiety wizualizowane są za pomocą innych kolorów, co ma istotne znaczenie w propagowaniu przestrzennej informacji pomiędzy wieloma użytkownikami w chmurze.



Rys. 4. Wizualizacja modułu manualnej konceptualizacji

Fig. 4. Visualization of the manual conceptualization module

## 6. Udostępnienie przestrzennej dokumentacji semantycznej w chmurze

Poprzez mobilność rozumie się nie tylko możliwość tworzenia dokumentacji przestrzennej w terenie, ale także możliwość przeprowadzenia konceptualizacji z wykorzystaniem nowoczesnego komputera przenośnego wyposażonego w procesor GPGPU. Dodatkowym ważnym aspektem mobilności jest udostępnienie przestrzennej dokumentacji semantycznej w lokalnej chmurze, dzięki czemu istnieje możliwość interakcji z poziomu dowolnego urządzenia mobilnego (laptop, smartphone, tablet). Najprostszym i najczęściej wykorzystywanym narzędziem Cloud Computing'u jest kolokacja danych, czyli dostęp do nich dla każdego użytkownika chmury równocześnie. Takie rozwiązanie pozwala pobierać wyniki pomiarów w postaci przetworzonych już obrazów wraz z informacją semantyczną. Krokiem następnym jest SaaS (Software as a Service) pozwalające wyświetlić na ekranie klienta (Laptopie, Tablecie, Smartfonie, SmartTV) wyniki działania aplikacji uruchomionej na serwerze, oraz wykonywać pracę na tym oprogramowaniu. Mniej ważna jest moc obliczeniowa urządzenia klienta (poza koniecznością odtworzenia strumienia audiowizualnego z serwera), niż prędkość transferu danych w sieci. W tej technologii, bez względu na platformę klienta pracującego na oprogramowaniu udostępnianym w chmurze, możliwe jest dodawanie informacji semantycznej używając dowolnej platformy sprzętowej. W niniejszym eksperymencie użyte zostało oprogramowanie Citrix XenApp 6.0 pracujące pod kontrolą systemu operacyjnego Windows 2008 Server i udostępniające w chmurze autorskie oprogramowanie pozwalające na manualną konceptualizację obszarów chmury punktów dostarczonych ze skanera Z+F IMAGER 5010. Rysunek 5 pokazuje pracę na oprogramowaniu z wykorzystaniem tabletu Ipad pierwszej generacji. Obraz wyników pracy (manualnej konceptualizacji) jest dostępny niemal natychmiast (opóźnienie rzędu jednej sekundy) dla wszystkich użytkowników SaaS korzystających z tego samego pliku wymiany



danych, bez względu na platformę sprzętową wykorzystywaną przez nich.



Rys. 5. Wizualizacja modułu współdzielącego przestrzenną dokumentację semantyczną  
Fig. 5. Visualization of the module sharing the spatial semantic documentation

## 7. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono prototyp mobilnego systemu do tworzenia przestrzennej dokumentacji semantycznej. Zastosowane technologie (skaning laserowy, GPGPU, Cloud Computing) umożliwiają gromadzenie, filtrację oraz rejestrację danych przestrzennych w postaci chmur punktów oraz udostępnienie tej dokumentacji z poziomu dowolnego urządzenia mobilnego (Laptop, Tablet, Smartfonie, a nawet SmartTV). Zrealizowano moduł manualnej konceptualizacji do etykietowania istotnych fragmentów modelu. Opracowano architekturę *niezależnej chmury*, udostępniającą przestrzenną dokumentację semantyczną tworzoną w trybie on-line. Przewiduje się, że prototyp systemu po uwzględnieniu kilku usprawnień technologicznych znajdzie zastosowanie w aplikacjach Zarządzania Kryzysowego, gdzie przestrzenna dokumentacja semantyczna pozwoli na usprawnienie koordynacji służb ratowniczych, do tworzenia dokumentacji przebiegu samej akcji ratowniczej, a także w wielu innych sytuacjach wymagających posiadania przestrzennych danych obiektu lub otoczenia w trybie on-line. Na tym etapie prototypu, system umożliwi budowę przestrzennej dokumentacji semantycznej w przeciągu

kilkunastu minut, przy czym wynik pracy systemu jest dostępny dla użytkowników w trybie natychmiastowym.

## 8. Przyszłe prace badawcze

W ramach przyszłych prac badawczych planowane jest częściowe zastąpienie modułu manualnej konceptualizacji modułem inteligentnym, wyposażonym w algorytmy rozpoznawania kształtów. Automatyczne rozpoznawanie kształtów przyczyni się do sprawniejszej interakcji z systemem. Oraz wyposażenie naziemnego skanera laserowego w kamerę cyfrową w celu akwizycji naturalnych kolorów obiektów i kolorowania zebranych chmur punktów.

## 9. Literatura

- [1] Nuchter A., Hertzberg J., Towards semantic maps for mobile robots, *Robot. Auton. Syst. Elsevier* 56 (11) 915-926, (2008).
- [2] Asada M., Shirai Y., Building a world model for a mobile robot using dynamic semantic constraints, *Proc. 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1629-1634 (1989).
- [3] Elsberg J., Bormann D., Nuchter A., Efficient processing of large 3D point clouds, *XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, Sarajevo (2011).
- [4] Będkowski J., Masłowski A., De Cubber G., Real time 3D localization and mapping for USAR robotic application, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 39 Iss: 5, pp. 464-474 (2012).
- [5] Besl P. J., McKay N. D., A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special issue on interpretation of 3-D scenes—part II*, Volume 14, Issue 2, pp. 239-256 (1992).
- [6] Kitaaki Y., Okuda H., Kage H., Sumi K., High speed 3-d registration using GPU, in: *SICE Annual Conference*, Tokyo, pp. 3055 - 3059.
- [7] Nuchter A., Feyzabadi S., Qiu D., May S., SLAM la carte – GPGPU for Globally Consistent Scan Matching, in: *Proceedings of the 4th European Conference on Mobile Robots (ECMR '11)*, Orebro, Sweden.
- [8] Elseberg J., Bormann D., Nuchter A., Efficient Processing of Large 3D Point Clouds, in: *Proceedings of the XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT'11)*, IEEE Xplore, Sarajevo, Bosnia, 2011.
- [9] Qiu D., May S., Nuchter A., GPU-accelerated Nearest Neighbor Search for 3D Registration, in: *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS '09)*, number 5815 in LNCS, Liege, Belgium, pp. 194-203.

otrzymano / received: 15.09.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

# Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK

ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA

44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl