

**Maciej SZELEWSKI**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

**Liczba punktów pomiarowych a dokładność odtworzenia powierzchni swobodnej w procesie inżynierii odwrotnej****Mgr inż. Maciej SZELEWSKI**

Absolwent Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Studia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Mechatronika ukończył w 2002 roku. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn PP. Obszar zainteresowań to wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej oraz systemów CAD 3D w procesie inżynierii odwrotnej.

e-mail: maciej.szelewski@put.poznan.pl

**Streszczenie**

Rozwój techniki pozwala dzisiaj na zastosowanie w procesie inżynierii odwrotnej wielu różnych urządzeń i metod do dyskretyzacji geometrii różnych obiektów. Każde z urządzeń jak i metod obciążone są pewnymi błędami, dlatego też, aby mówić o dokładnościowym aspekcie odtworzenia elementu w procesie inżynierii odwrotnej należy dokładnie zbadać i rozpoznać niedokładności, z jakimi mamy do czynienia w poszczególnych jej etapach. Dzisiaj ze względu na powszechne zastosowanie w przemyśle współrzędnościowych maszyn pomiarowych wykorzystuje się je do dyskretyzacji geometrii obiektów. W artykule opisano badania nad dokładnością odtworzenia powierzchni swobodnej w procesie inżynierii odwrotnej w zależności od liczby punktów pomiarowych otrzymanych w wyniku dyskretyzacji powierzchni swobodnej na współrzędnościowej maszynie pomiarowej.

**Słowa kluczowe:** dyskretyzacja, inżynieria odwrotna, system CAD 3D, powierzchnia swobodna

## The number of measuring points versus the accuracy of reconstructing the free-form surface in the Reverse Engineering process

**Abstract**

Nowadays, the technical progress enables to use in the reverse engineering process a wide range of methods and devices for discretization of various objects. Every method and device, however, is subjected to a certain error. Hence, the accuracy of object reproduction is affected by the accuracy of each stage of Reverse Engineering process. At present, Coordinate Measuring Machines (CMM) are widely applied in industry, and they are often used for discretization of objects geometry for RE. In the paper, the accuracy analysis of the free surface reproduction in reverse engineering process, and its dependence on the number of measuring points has been discussed.

**Keywords:** digitizing, Reverse Engineering, CAD 3D system, free-form surface

**1. Wstęp**

Zastosowanie i integracja w projekcie narzędzi do dyskretyzacji, komputerowych technik wspomagających projektowanie (CAD) i wytwarzanie (CAM) oraz maszyn CNC pozwala na odtworzenie, wykonanie kopii czy części zamiennej obiektu fizycznego. Takie podejście do projektowania jest odwrotne do tradycyjnego procesu projektowania i jest określane terminem inżynieria odwrotna (ang. *Reverse*

*Engineering* – RE). Inżynieria odwrotna jako proces projektowania ma dzisiaj bardzo szerokie spektrum zastosowania i jest wykorzystywana między innymi w takich obszarach nauki i przemysłu jak:

- inżynieria produkcji,
- inżynieria oprogramowania,
- inżynieria chemiczna,
- przemysł elektrotechniczny,
- przemysł systemów mikro-elektromechanicznych,
- przemysł filmowy,
- medycyna,
- archeologia,
- architektura.

W licznych publikacjach naukowych czy popularno-naukowych dotyczących inżynierii odwrotnej przytacza się wiele jej opisów czy też definicji [2, 7, 8, 9, 10, 12]. Większość z tych definicji jednak ze względu na liczne obszary zastosowania inżynierii odwrotnej nie można traktować uniwersalnie. Tak liczne obszary zastosowania inżynierii odwrotnej utrudniają sformułowanie jakiejś jednej ogólnej definicji.

W literaturze światowej można znaleźć właściwie jedną pozycję książkową, pt. „*Reverse Engineering*” autorstwa Kathryn A. Ingle, która w całości poświęcona jest inżynierii odwrotnej w zakresie inżynierii produkcji [3]. Autorka definiuje inżynierię odwrotną jako czteroetapowy proces opracowania technicznych danych np. urządzenia, elektronicznego komponentu czy programu komputerowego, poprzez szczegółową analizę jego funkcji i postaci. Ta szczegółowa analiza zwykle jest wykonywana w celu opracowania i skonstruowania nowego urządzenia albo programu aby skutecznie wspierać wykorzystanie zasobów kapitałowych i zwiększyć zdolność produkcyjną. Te cztery etapy opracowania technicznych danych w procesie inżynierii odwrotnej to:

1. Ocena i weryfikacja.
2. Wytwarzanie technicznych danych.
3. Weryfikacja projektu.
4. Wdrożenie projektu.

Każdy z tych etapów składa się z pewnych zadań. Jednym z głównych celów w etapie oceny i weryfikacji jest kontrola wymiarowa – dyskretyzacja numeryczna geometrii obiektu. Polega ona na pomiarze przestrzennej geometrii obiektu i zapisaniu jej w formacie cyfrowym – czytelnym dla komputera [2].

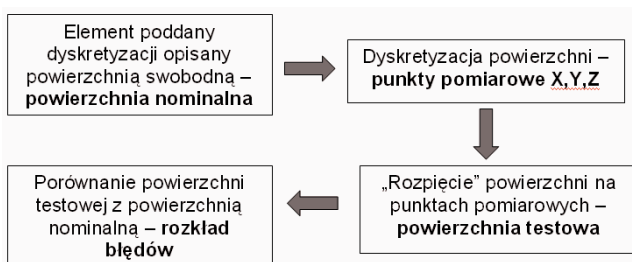
Dyskretyzację numeryczną przestrzennej geometrii obiektu można przeprowadzić dwiema metodami: metodą stykową i metodą bezstykową. Obecnie można zaobserwować bardzo intensywny rozwój głównie metod bezstykowych w postaci różnych konstrukcji przestrzennych skanerów optycznych. Jednak najpowszechniejszymi urządzeniami wykorzystywanymi do dyskretyzacji są współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP). Wynika to choćby z tego, że coraz więcej przedsiębiorstw jest wyposażona we WMP i jest coraz łatwiejszy dostęp do tego typu urządzeń [10]. Inne fakty potwierdzające częstsze wykorzystywanie WMP to większa dokładność oraz możliwość zastosowania do dyskretyzacji zarówno metod stykowych (głowice impulsowe czy skaningowe), jak i metod

bezystykowych (głowice laserowe). W przypadku wykorzystania metod stykowych na WMP wprawdzie zyskujemy na dokładności, to jednak zwłaszcza przy dużej liczbie punktów pomiarowych czas dyskretyzacji elementu znacznie się wydłuża. Natomiast wykorzystanie do dyskretyzacji WMP wyposażonej w głowicę laserową choć znacznie skraca czas dyskretyzacji, to niestety dane pomiarowe zbierane są mniej dokładnie (prawie o rząd wielkości) w porównaniu z głowicami stykowymi [5]. Dlatego też należy zadać sobie pytanie na czym bardziej nam zależy, który czynnik, dokładność czy czas, jest czynnikiem priorytetowym. Inne pytania jakie nasuwają się, to z jaką gęstością należy dyskretyzować element, ile trzeba zebrać punktów pomiarowych aby stworzyć model CAD z określoną dokładnością? Czy im więcej punktów pomiarowych tym większa dokładność odtworzenia powierzchni w systemie CAD?

W dalszej części artykułu opisano przeprowadzone badania które pozwolą odpowiedzieć na postawione pytania. Rozważania zostały przeprowadzone na elemencie opisanym powierzchnią swobodną przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania pomiarowego i systemu CAD.

## 2. Ogólny opis badań

Celem badań, jak już na wstępie napisano, było określenie wpływu liczby punktów pomiarowych na dokładność odtworzenia, zamodelowania powierzchni swobodnej w systemie CAD 3D. Rozważania te zostały przeprowadzone według schematu przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat badań  
Fig. 1. General diagram of research

Elementem wyjściowym do badań był element opisany w przestrzeni powierzchnią swobodną. Analizując krzywiznę średnią powierzchni, wyznaczono zakres krzywizny: od +0,013 do -0,00005 [11]. Powierzchnia elementu wyjściowego przyjęta jako powierzchnia nominalna była poddawana dyskretyzacji punktami pomiarowymi o współrzędnych X,Y,Z rozmieszczonymi z różną gęstością (tab. 1). Dyskretyzowany obszar powierzchni to kwadrat o boku 95mm. Otrzymane w wyniku dyskretyzacji punkty pomiarowe wczytywano następnie do systemu CAD 3D, gdzie bezpośrednio na tych punktach „rozpinano” powierzchnię NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) otrzymując powierzchnię testową. W kolejnym kroku porównano wygenerowaną powierzchnię testową z powierzchnią nominalną wykorzystując oprogramowanie inspekcyjne. W wyniku tej operacji otrzymano rozrzut i rozkład odchyleń powierzchni testowej od powierzchni nominalnej. Otrzymane w ten sposób wyniki opracowano w postaci histogramów a na wykresach zestawiono maksymalne rozrzuty.

Tab. 1. Liczba punktów pomiarowych i odpowiadająca im gęstość dyskretyzacji  
Tab. 1. The number of measuring points and the density of the digitizing

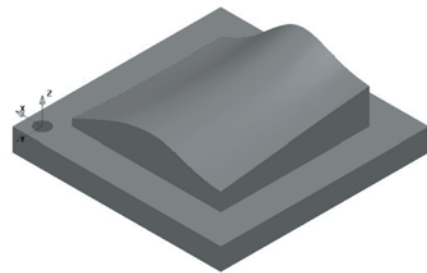
Liczba punktów	170	300	650	2500	10000	40000	160000	250000
Gęstość dyskretyzacji [pkt/mm]	0,125	0,166	0,25	0,5	1	2	4	5

Analiza wpływu liczby punktów pomiarowych na dokładność odtworzenia powierzchni swobodnej w systemie CAD 3D

przewodzona była w dwóch etapach. Pierwszy etap rozważań były to badania symulacyjne w celu rozpoznania zjawiska, natomiast drugi etap były to badania przeprowadzone w rzeczywistych warunkach w celu weryfikacji badań symulacyjnych – badania weryfikacyjne.

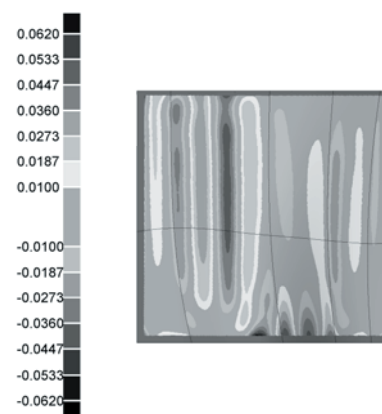
## 3. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne prowadzone były z wykorzystaniem systemu CAD 3D i oprogramowania pomiarowego w wersji *off-line* (tworzenie programu pomiarowego poza maszyną na podstawie modelu CAD). Jako element wyjściowy w tych badaniach został wykorzystany model CAD (rys. 2).



Rys. 2. Dyskretyzowany model CAD  
Fig. 2. Discretization CAD model

Model ten po wczytaniu zarówno do systemu CAD 3D jak i do oprogramowania pomiarowego *off-line* został poddany dyskretyzacji. Dyskretyzacja w przypadku systemu CAD 3D odbywała się w ten sposób, że w pierwszej kolejności stworzono na płaszczyźnie siatkę punktów o określonej gęstości, a następnie punkty te rzutowano na powierzchnię nominalną. Natomiast dyskretyzacja w programie pomiarowym przebiegała jako symulacja dyskretyzacji powierzchni elementu na WMP, z tą różnicą, że nie dyskretyzowano fizycznego elementu a nominalną powierzchnię modelu CAD. Otrzymane w obu przypadkach punkty pomiarowe były punktami „leżącymi” na nominalnej powierzchni modelu CAD. W kolejnym kroku na punktach, wykorzystując system CAD 3D i jego algorytmy generowania powierzchni typu NURBS, stworzono powierzchnię testową i w programie inspekcyjnym porównano ją z powierzchnią nominalną otrzymując rozkład błędów w postaci mapy odchyleń od powierzchni nominalnej (rys. 3).



Rys. 3. Przykładowy rozkład błędów [mm]  
Fig. 3. Exemplary distribution of errors [mm]

Otrzymany rozkład błędów pozwolił na wyznaczenie takich charakterystycznych wielkości jak: maksymalne i średnie odchylenia, odchylenie standardowe oraz procentowy rozkład odchyleń. Rozkład odchyleń analizowano przy liczbie punktów pomiarowych około 400000. W tabeli 2 i 3 zestawiono

przykładowe wartości otrzymane dla przypadku dyskretyzacji w programie pomiarowym z gęstością 0,5 pkt/mm w kierunku osi X i Y (2500 punktów pomiarowych).

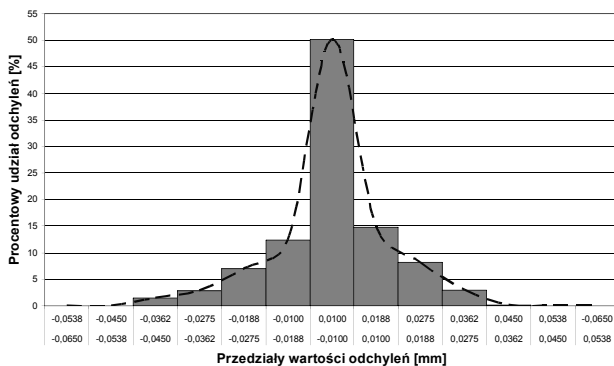
Tab. 2. Przykładowe wartości porównania powierzchni testowej z nominalną  
Tab. 2. Demonstration value comparison the test surface with nominal

ODCHYLENIE	WARTOŚĆ [mm]
Maksymalne dodatnie	<b>0,0499</b>
Maksymalne ujemne	<b>-0,0624</b>
Średnie dodatnie	<b>0,0119</b>
Średnie ujemne	<b>-0,0123</b>
Standardowe	<b>0,0152</b>

Tab. 3. Przykładowy procentowy udział odchyleń  
Tab. 3. Demonstration percentage participation of deviations

PRZEDZIAŁ		Ilość punktów	Udział procentowy [%]
≥MIN	<MAX		
-0,0625	-0,0538	34	0,0085
-0,0538	-0,0450	142	0,0356
-0,0450	-0,0362	5948	1,4891
-0,0362	-0,0275	11357	2,8433
-0,0275	-0,0188	28009	7,0123
-0,0188	-0,0100	49385	12,3640
-0,0100	0,0100	200190	50,1195
0,0100	0,0188	59085	14,7925
0,0188	0,0275	32593	8,1600
0,0275	0,0362	11823	2,9600
0,0362	0,0450	673	0,1685
0,0450	0,0538	186	0,0466
0,0538	0,0625	0	0,0000

Na podstawie danych z tabeli 3 został wykreślony histogram – udział procentowy poszczególnych przedziałów odchyleń (rys. 4).



Rys. 4. Histogram  
Fig. 4. Histogram

W celu określenia wpływu gęstości dyskretyzacji na dokładność odtworzenia powierzchni swobodnej w systemie CAD 3D, dla każdej liczby punktów pomiarowych zgodnie ze wzorem (1) obliczono rozstęp rozkładu jako różnicę między największą i najmniejszą wartością odchylenia [4]. Obliczone rozstępy w celach porównawczych zestawiono na wykresie (rys. 5).

$$R = x_{+\max} - x_{-\max} \quad (1)$$

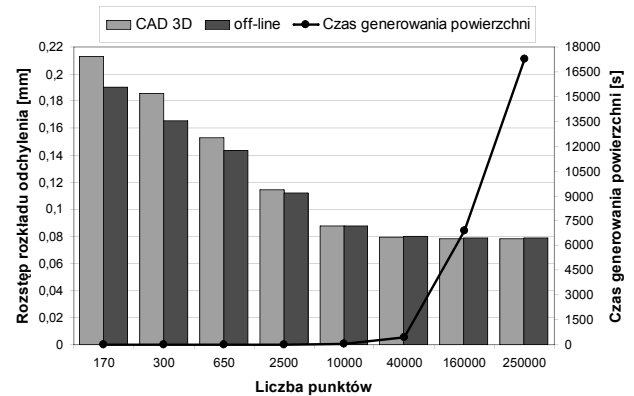
gdzie:

$x_{+\max}$  - maksymalne odchylenie dodatnie,

$x_{-\max}$  - maksymalne odchylenie ujemne,

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że dyskretyzując powierzchnię większą liczbą punktów pomiarowych otrzymujemy mniejsze odchylenia odtworzonej powierzchni w systemie CAD 3D. Dochodzimy jednak do pewnej granicy, powyżej której nie

ma uzasadnienia dyskretyzowanie powierzchni z większą gęstością. Granica ta, to 2 pkt/mm w kierunku osi X i Y (40000 punktów) zarówno w przypadku dyskretyzacji w systemie CAD 3D jak i w oprogramowaniu pomiarowym *off-line*. Powyżej tej granicy zmiany odchyleń są tak niewielkie, że praktycznie nieistotne. Na wykresie również zestawiono orientacyjny czas generowania powierzchni w zależności od liczby punktów pomiarowych. Oczywiście należy tutaj zaznaczyć, że czas ten jest bardzo subiektywny i zależy m.in. od algorytmów obliczeniowych stosowanych w systemie CAD jak i w mocy obliczeniowej jednostki komputerowej na której przeprowadzono obliczenia. Wykres czasu również posiada wyraźną granicę (podobnie jak w przypadku zmian odchyleń) powyżej której czas generowania znacznie się wydłuża.



Rys. 5. Zestawienie wyników badań symulacyjnych  
Fig. 5. Setting-up simulation research findings

W celu weryfikacji otrzymanych wyników z badań symulacyjnych na modelu CAD, przeprowadzono również badania na fizycznym elemencie w rzeczywistych warunkach – kolejny rozdział bliżej opisuje te rozważania.

## 4. Badania weryfikacyjne

Badania weryfikacyjne przebiegały według podobnej procedury co badania symulacyjne, zgodnie z ogólnym schematem badań zamieszczonym na rysunku 1. W tym przypadku jednak do badań wykorzystano współrzędnościową maszynę pomiarową sterowaną CNC i wyposażoną w głowicę stykową skaningową. Widok maszyny prezentuje rysunek 6, a jej podstawowe parametry to:

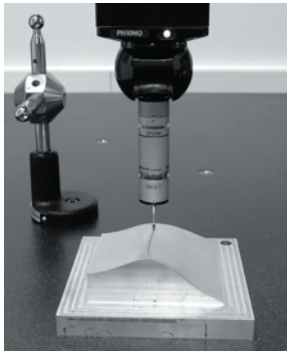
- błąd graniczny dopuszczalny  $MPE_E = \pm (1,5 + L/333)$   $\mu\text{m}$ ,
- przestrzeń pomiarowa XYZ: 700×700×500 mm



Rys. 6. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa  
Fig. 6. Coordinate measuring machine

Badania odbywały się z zachowaniem warunków powtarzalności w pomieszczeniu klimatyzowanym. Przedmiot

poddany dyskretyzacji był to rzeczywisty element wykonany ze stopu AlZn 5Mg3Cu (rys. 7).

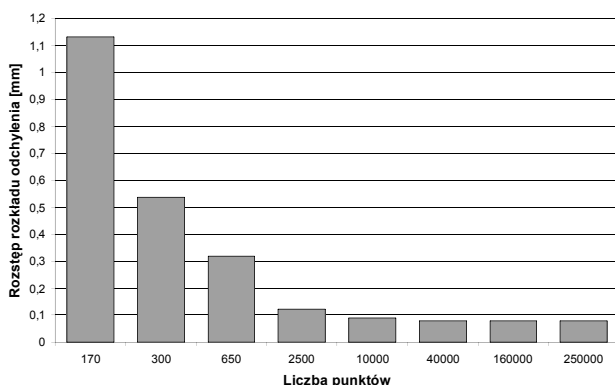


Rys. 7. Rzeczywisty element podczas dyskretyzacji  
Fig. 7. Actual element during the discretization

Podobnie jak to miało miejsce w badaniach symulacyjnych, również tutaj w wyniku dyskretyzacji powierzchni elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej otrzymano punkty pomiarowe, na których w systemie CAD 3D „rozpięto” powierzchnię testową NURBS. Otrzymaną powierzchnię następnie porównano z nominalną powierzchnią (powierzchnia rzeczywistego elementu), wykorzystując w tym celu możliwości przeprowadzenia inspekcji na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Powierzchnię testową porównano z powierzchnią nominalną z rozdzielczością 1 punkt pomiarowy co 0,152 mm, co w efekcie dało około 400000 punktów pomiarowych, w których sprawdzano odchylenie powierzchni testowej od powierzchni nominalnej. W ten sposób otrzymano odchylenia dla wszystkich gęstości dyskretyzacji i opracowane wyniki zestawiono na wykresie słupkowym (rys. 8). Dodatkowo w tabeli 4 zestawiono wartości charakterystycznych wielkości otrzymanych w wyniku inspekcji i przeprowadzonych obliczeń.

Tab. 4. Zestawienie opracowanych wyników  
Tab. 4. Matching results elaborated

Liczba punktów	Odchylenie MAX(+) [mm]	Odchylenie MAX (-) [mm]	Wartość rozstępu [mm]	Odchylenie standardowe [mm]
170	0,7568	-0,3741	1,1309	0,0545
300	0,3378	-0,1992	0,5370	0,0272
650	0,2282	-0,0922	0,3204	0,0175
2500	0,0752	-0,0481	0,1233	0,0150
10000	0,0476	-0,0417	0,0893	0,0152
40000	0,0418	-0,0378	0,0796	0,0155
160000	0,0406	-0,0383	0,0789	0,0154
250000	0,0424	-0,0368	0,0792	0,0154



Rys. 8. Zestawienie wyników badań weryfikacyjnych  
Fig. 8. Setting-up verification research findings

Wyniki badań weryfikacyjnych potwierdzają badania symulacyjne – podobnie jak w badaniach symulacyjnych również

tutaj wraz ze wzrostem liczby punktów pomiarowych maleje wartość maksymalnych odchyień czyli wartość rozstępu. Widoczna jest również graniczna liczba punktów pomiarowych (40000 – podobnie jak w badaniach symulacyjnych) powyżej której odchylenie praktycznie się nie zmienia. W badaniach weryfikacyjnych można również, przy niższych liczbach punktów pomiarowych (170, 300, 600), zaobserwować dość znaczne różnice w wartościach rozstępu w porównaniu z badaniami symulacyjnymi. Wynika to, z faktu, że podczas dyskretyzacji na współrzędnościowej maszynie pomiarowej nie zostały zarejestrowane punkty pomiarowe na granicach obszaru skanowania.

## 5. Podsumowanie

Założone na początku tych rozważań intuicyjne przypuszczenie, że wraz ze wzrostem gęstości dyskretyzacji powierzchni swobodnej (większa liczba punktów pomiarowych) zwiększa się dokładność odtworzenia tej powierzchni w systemie CAD 3D, potwierdziły zarówno badania symulacyjne na obiekcie wirtualnym jak i badania weryfikacyjne na obiekcie rzeczywistym. Badania te również wykazały, że zwiększanie gęstości punktów pomiarowych z naukowego punktu widzenia ma uzasadnienie do pewnej granicy, powyżej której dokładności pozostają na tym samym poziomie. Również z praktycznego punktu widzenia zastosowanie liczby punktów pomiarowych powyżej tej granicy jest nieuzasadnione ze względu na czas generowania powierzchni liczony w godzinach.

## 6. Literatura

- [1] Arendarski J.: Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [2] Chlebus E.: Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [3] Ingle Kathryn A.: Reverse Engineering. McGraw-Hill, Inc., New York 1994.
- [4] Kotulski Z., Szczepiński W.: Rachunek błędów dla inżynierów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [5] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [6] Skubis T.: Opracowanie wyników pomiarów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [7] Budak I., Hodolic J., Sokolic M.: Development of a programme system for data-point pre-processing In Reverse Engineering. Journal of Materials Processing Technology 162-163, 2005, pp. 730-735.
- [8] Gawlik J., Juras B., Karbowski K., Wójcik A.: Koncepcja oceny dokładności powierzchni swobodnych w systemie inżynierii odwrotnej. X Krajowa, I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Metrologia w Technikach Wytwarzania, Kraków, 2003.
- [9] Grzelka M., Szelewski M.: Discretization and modeling stage in the reverse engineering. VIIIth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Ustroń, April 2006, strony 105-112.
- [10] Motavalli S.: Review of Reverse Engineering approaches. In: 23<sup>rd</sup> International Conference on Computers and Industrial Engineering, vol. 35, Nos. 1-2, 1998, pp. 25-28.
- [11] Putz B.: Metody oceny gładkości powierzchni krzywoliniowych do zastosowań CDA/CAM. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe Mechanika z. 195. Warszawa 2002.
- [12] Várady T., Martin R. R., Cox J.: Reverse Engineering of geometric models. Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, 1997, pp. 255-268.

Przedstawione badania realizowane są w ramach grantu promotorskiego nr KBN-22/0560/T02/2006/30, którego kierownikiem jest prof. dr inż. Jan Chajda.

Artykuł recenzowany