

Dominik HYLEWSKI¹

PRÓBA WERYFIKACJI METODY DOBORU PARAMETRÓW DIGITALIZACJI POWIERZCHNI SWOBODNEJ DLA CELÓW INŻYNIERII ODWROTNEJ W SYSTEMIE CATIA V5

Artykuł przedstawia próbę weryfikacji metody, której zadaniem ma być umożliwienie oszacowania wartości błędu, jaki powstanie w wyniku odtworzenia powierzchni swobodnej z „chmury punktów” składającej się, w zależności od parametrów digitalizacji, z różnej liczby punktów. Wszystkie działania związane z weryfikacją metody przeprowadzono w sposób modelowy w systemie CATIA V5. Generowanie „chmury punktów” w etapie digitalizacji przeprowadzono analogicznie do strategii digitalizacji powierzchni swobodnych oferowanej przez oprogramowanie pomiarowe PowerINSPECT 4.16, stosowanej na współrzędnościowej maszynie pomiarowej w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej.

1. WSTĘP

W założeniu metoda doboru parametrów digitalizacji powierzchni swobodnej ma składać się z czterech podstawowych etapów przedstawionych na rys. 1. Głównym zadaniem weryfikacji tej metody było uściślenie zależności pomiędzy informacjami uzyskiwanymi w drugim etapie metody (parametry digitalizacji oraz prognozowana dla nich wartość błędu), a rzeczywistą dokładnością odtworzenia powierzchni. Dalszy opis etapów metody zostanie przeprowadzony na przykładzie konkretnej powierzchni swobodnej.

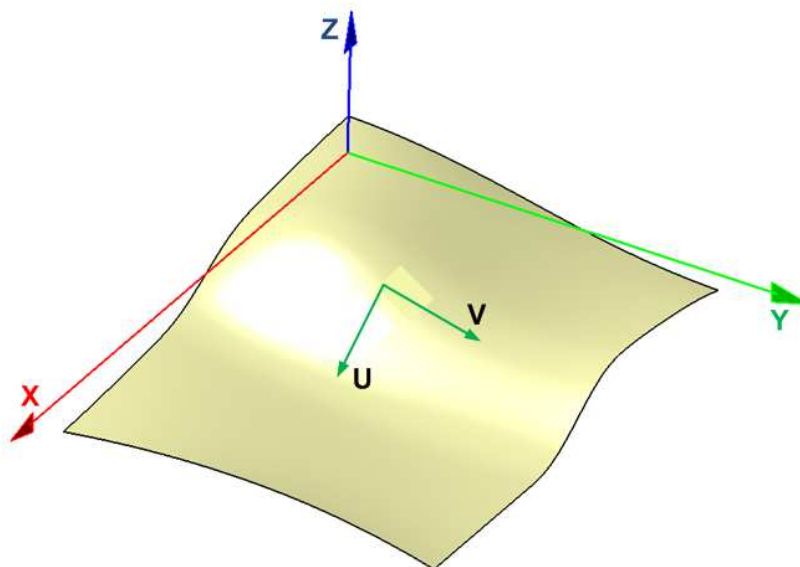


Rys. 1. Etapy proponowanej metody
Fig. 1. Stages of proposed method

¹ Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach

2. ANALIZA MODELOWA W SYSTEMIE CATIA

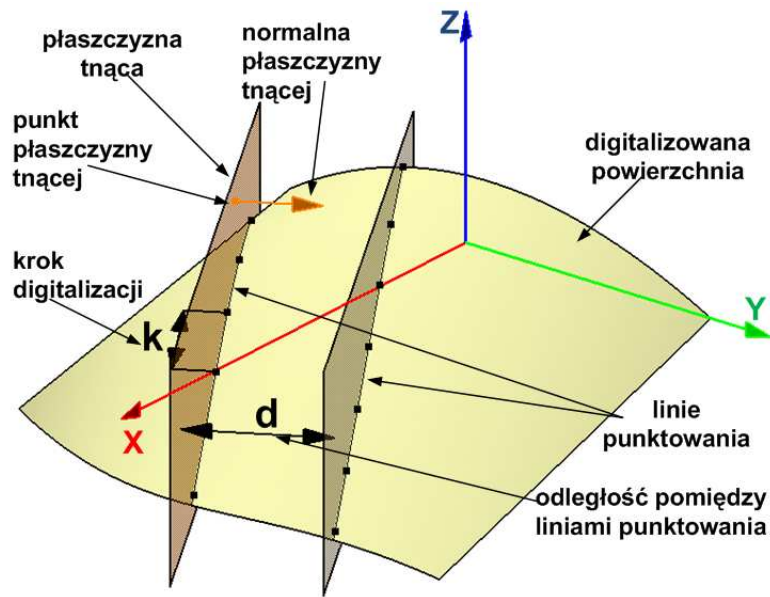
W środowisku CATIA zamodelowano powierzchnię swobodną referencyjną (rys. 2). Powierzchnia ta została stworzona z czterech przekrojów, a jej cechą charakterystyczną jest to, że jej krzywizna [1] w kierunku (U) osi X zmienia się znacznie bardziej niż w kierunku (V) osi Y. Powierzchnia swobodna ma postać płyta prostokątnego o wymiarach 90 na 70mm.



Rys. 2. Referencyjna powierzchnia swobodna
Fig. 2. Reference free-form surface

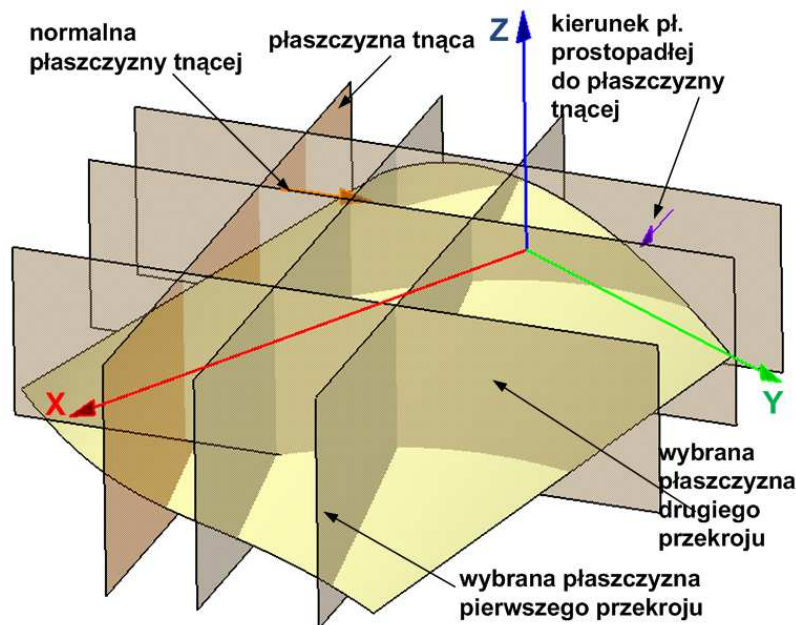
2.1. PRZEPROWADZENIE WSTĘPNEGO POMIARU

Przeprowadzenie wstępnego pomiaru polega na odwzorowaniu np. poprzez digitalizację zarysów dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojów rozpatrywanej powierzchni. Wybór pierwszego z przekrojów jest ściśle uzależniony od ustawień strategii digitalizacji. W opisywanym przykładzie chmury punktów będą wygenerowane zgodnie ze strategią „równoległy zarys” oferowaną przez oprogramowanie pomiarowe PowerINSPECT 4.16, konieczne jest zatem jej scharakteryzowanie. Istota tej strategii (rys. 3) polega na określeniu w pierwszym kroku „płaszczyzny tnącej” np. poprzez punkt należący do tej płaszczyzny i jej wektor normalny. W płaszczyźnie tej następuje digitalizacja z krokiem „k”, w sposób uwzględniający zmieniającą się krzywiznę powierzchni. Tak tworzona jest linia punktowania. Następnie tworzona jest kolejna taka linia w płaszczyźnie równoległej do „płaszczyzny tnącej” i oddalonej od niej o „odległość pomiędzy liniami punktowania” – „d”. Proces powtarzany jest, aż do zakończenia digitalizacji określonego obszaru. Parametry digitalizacji – „k” i „d” podawane są w milimetrach i wpływają na gęstość rozmieszczenia punktów na digitalizowanej powierzchni.



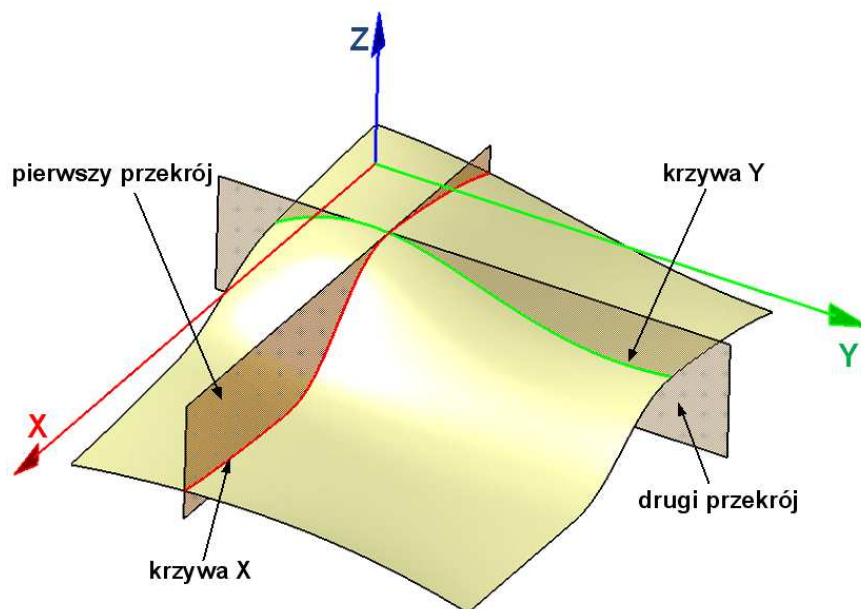
Rys. 3. Istota strategii „równoległy zarys”
 Fig. 3. Method of digitalization offered by measuring software

Pierwszy przekrój musi leżeć w płaszczyźnie równoległej do „płaszczyzny tnącej” oraz w której powierzchnia na tym kierunku osiąga największą krzywiznę. Drugi przekrój musi leżeć na kierunku płaszczyzny prostopadłej do „płaszczyzny tnącej”, przechodzącej przez jedną z osi układu współrzędnych i także, w którym na tym kierunku powierzchnia osiąga największą krzywiznę. Przykład wzajemnego usytuowania przekrojów z wyżej wymienionymi ograniczeniami przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Przykładowe rozmieszczenie przekrojów
 Fig. 4. An example of cross-section positions

Wybór „płaszczyzny tnącej” oraz analiza krzywizny zamodelowanej powierzchni referencyjnej pozwoliła na wybór, z wcześniej opisywanymi warunkami, dwóch przekrojów (drugi przekrój był równoległy do płaszczyzny prostopadłej do „płaszczyzny tnącej” i przechodził przez oś Z układu współrzędnych) – rys. 5, i ich odwzorowanie w postaci krzywych, które stają się krzywymi referencyjnymi, nazywanymi dalej dla uproszczenia krzywymi X i Y. Uzyskane w ten sposób dane kończą pierwszy etap metody.



Rys. 5. Wybrane przekroje powierzchni referencyjnej
Fig. 5. Selected cross-sections of reference free form surface

2.2. ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Analiza danych pomiarowych ma na celu oszacowanie błędu odtworzenia powierzchni swobodnej referencyjnej dla wybranych parametrów digitalizacji. Oszacowanie to będzie realizowane przy założeniu prawdziwości hipotezy, że wartość błędu odtworzenia powierzchni swobodnej referencyjnej jest uzależniona od błędów, jakie powstaną przy odtwarzaniu krzywych X i Y, dla różnych liczb punktów, a zatem dla różnych parametrów digitalizacji. Hipotezę taką można przyjąć, kierując się następującym sposobem myślenia: dobierając parametry digitalizacji tylko dla przekrojów powierzchni o największych krzywiznach, (krzywa X i krzywa Y) pozostałe przekroje, dla identycznych parametrów digitalizacji, zostaną zdigitalizowane z mniejszym błędem. W niniejszym artykule rozpatrzono przypadek odtwarzania powierzchni referencyjnej do postaci powierzchni utworzonej przez triangulację punktów.

Wybrano wartości parametrów digitalizacji. Ze względu na to, że krzywa X będzie digitalizowana adaptacyjnie, podzielona została na 120 równych odcinków, wyznaczonych przez 121 punktów. Odległość mierzona wzdłuż krzywej pomiędzy kolejnymi punktami wynosiła 0.8014985mm. Wykonanie takiego podziału daje możliwość wyboru „bez reszty”

piętnastu różnych kroków digitalizacji „k” wzdłuż krzywej, z których wybrano sześć, co: 5 (4.0074925mm), 6 (4.808991mm), 8 (6.411988mm), 10 (8.014985mm), 15 (12.022477mm), 20 (16.02997mm) odcinków. Krzywa Y będzie digitalizowana wzdłuż kierunku osi Y, w związku z tym przyjęto następujące wartości parametru odległości pomiędzy liniami punktowania – „d”: 3.5, 5, 7, 10, 14mm. W dalszej części pracy stosowane będą dla uproszczenia oznaczenia zdigitalizowanych w postaci punktów krzywych X i Y (tabela 1).

Tabela 1. Sposób oznaczania zdigitalizowanych krzywych X i Y
Table 1. Notation of digitalized curves X and Y

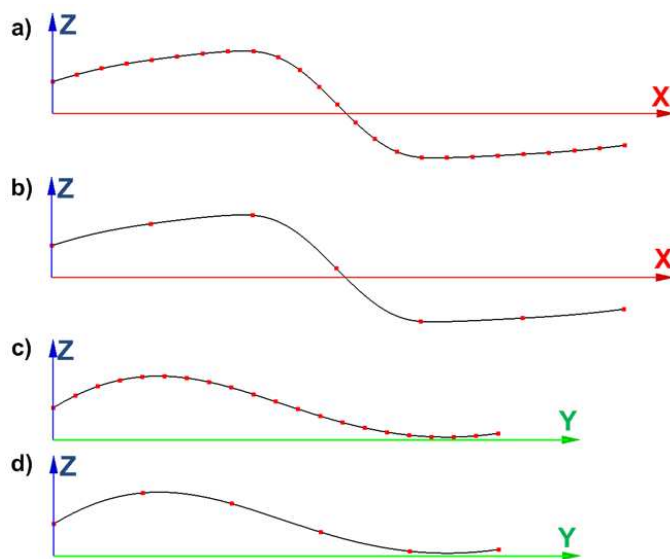
L.p.	Krzywa X		Krzywa Y	
	Oznaczenie zdigitalizowanej krzywej X	Odpowiadający parametr digitalizacji „k” mm	Oznaczenie zdigitalizowanej krzywej Y	Odległość pomiędzy liniami punktowania „d” mm
1	X5	4.0074925	Y3.5	3.5
2	X6	4.808991	Y5	5
3	X8	6.411988	Y7	7
4	X10	8.014985	Y10	10
5	X15	12.022477	Y14	14
6	X20	16.02997	-	-

Wybrane parametry digitalizacji pozwalają stworzyć trzydzieści różnych chmur punktów będących kombinacjami parametrów digitalizacji krzywych X i Y. Do dalszej analizy wybrano 14 chmur punktów, które kolejno wraz z symbolicznymi oznaczeniami przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Symboliczne oznaczenia wybranych do dalszej analizy chmur punktów
Table 2. Symbolic notation of selected point clouds

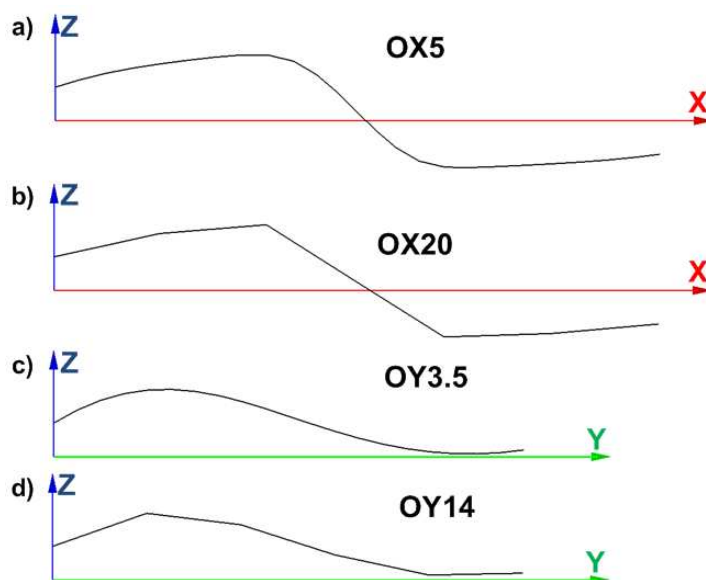
Numer chmury punktów	Oznaczenie chmury punktów
1	X5_Y3.5
2	X5_Y5
3	X6_Y3.5
4	X6_Y5
5	X6_Y7
6	X8_Y5
7	X8_Y7
8	X8_Y10
9	X10_Y5
10	X10_Y7
11	X10_Y10
12	X15_Y10
13	X15_Y14
14	X20_Y14

Wykonano digitalizację krzywych X i Y z podanymi w tabeli 1 parametrami. Przykłady otrzymanych wyników przedstawia rys 6.



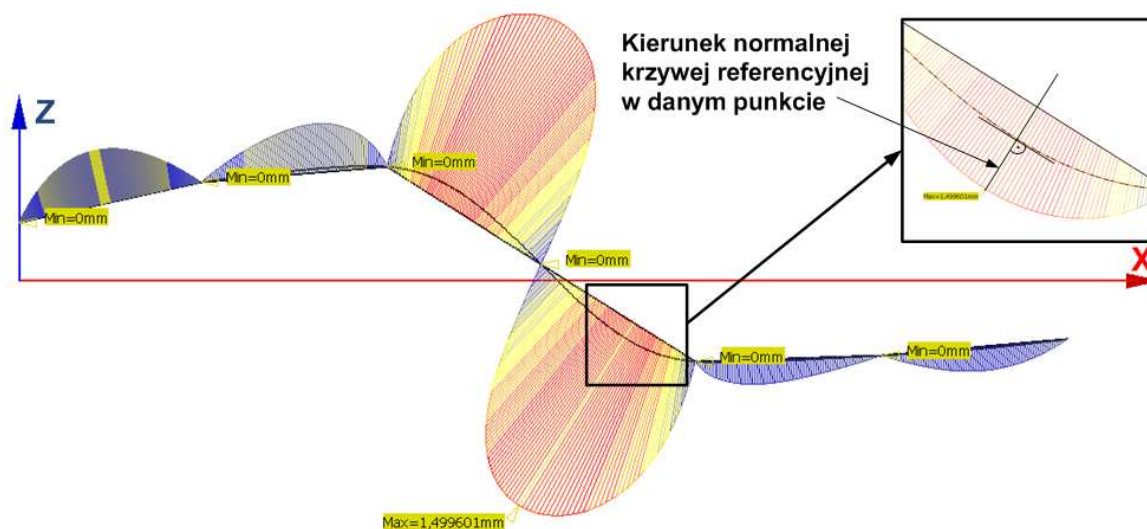
Rys. 6. Digitalizacja krzywych X i Y z parametrami: a) $k=4.0074925\text{mm}$, b) $k=16.02997\text{mm}$, c) $d=3.5\text{mm}$, d) $d=14\text{mm}$
 Fig. 6. Digitalization of curves X and Y with parameters: a) $k=4.0074925\text{mm}$, b) $k=16.02997\text{mm}$, c) $d=3.5\text{mm}$, d) $d=14\text{mm}$

W ten sposób ciągłe krzywe zostały zamienione na punkty, z których po ich połączeniu stworzono krzywe łamane (rys. 7), przedstawiające odtworzoną postać krzywych X i Y. Odtworzone postacie krzywych X i Y będą dalej oznaczane OX5, OX6, OY3.5, OY5 i tak dalej.



Rys. 7. Odtworzone krzywe: a) OX5, b) OX20, c) OY3.5, d) OY14
 Fig. 7. Reconstructed curves: a) OX5, b) OX20, c) OY3.5, d) OY14

Następnie dokonano oceny różnic pomiędzy krzywymi X i Y a poszczególnymi krzywymi odtworzonymi. Oceniana jest tutaj odległość od krzywej X lub Y (referencyjnych) do krzywej odtworzonej, mierzona w wielu punktach w kierunku normalnym do krzywej referencyjnej w danym punkcie. Przykład sposobu przeprowadzenia tej oceny przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Sposób oceny różnicy pomiędzy krzywą X (referencyjną), a krzywą łamaną
Fig. 8. Method of evaluation differences between curve X (reference), and reconstructed curve

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 3. Przy czym bezwzględną wartość różnicy pomiędzy odpowiednio krzywą X lub Y (krzywą referencyjną) a daną krzywą odtworzoną przyjęto określać po prostu: Błąd X i Błąd Y.

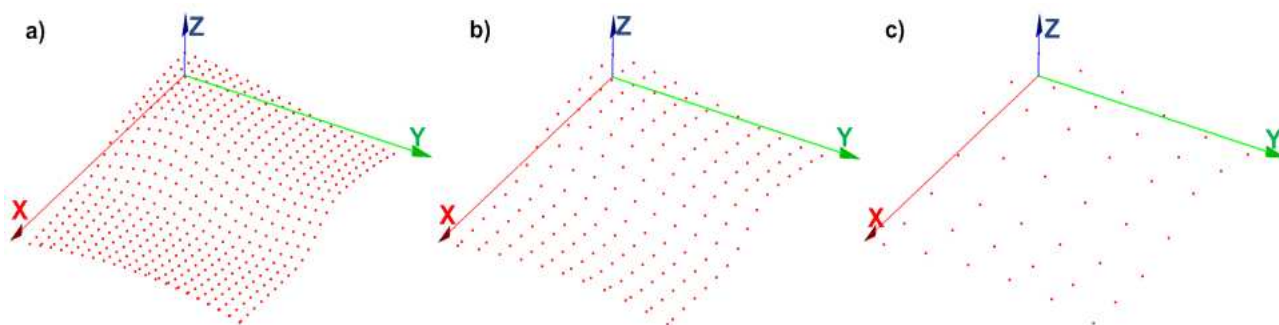
Tabela 3. Wyniki oceny różnic pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi
Table 3. Evaluated difference between curves

L.p.	odtworzona krzywa X	Błąd X mm	odtworzona krzywa Y	Błąd Y mm
1	OX5	0.164394	OY3.5	0.056159
2	OX6	0.222948	OY5	0.114037
3	OX8	0.406059	OY7	0.223868
4	OX10	0.595931	OY10	0.446079
5	OX15	0.742366	OY14	0.88672
6	OX20	1.499601	-	-

Otrzymane wyniki kończą etap analizy danych pomiarowych i zgodnie z wypowiedzianą hipotezą stanowią podstawę do oszacowania różnic pomiędzy powierzchnią referencyjną a powierzchniami zdigitalizowanymi, utworzonymi przez triangulację chmur punktów. W dalszym kroku należy utworzyć takie powierzchnie dla wymienionych parametrów digitalizacji, ocenić ich różnicę pomiędzy powierzchnią referencyjną i określić relację pomiędzy tą różnicą a Błędami X i Y.

2.3. DIGITALIZACJA

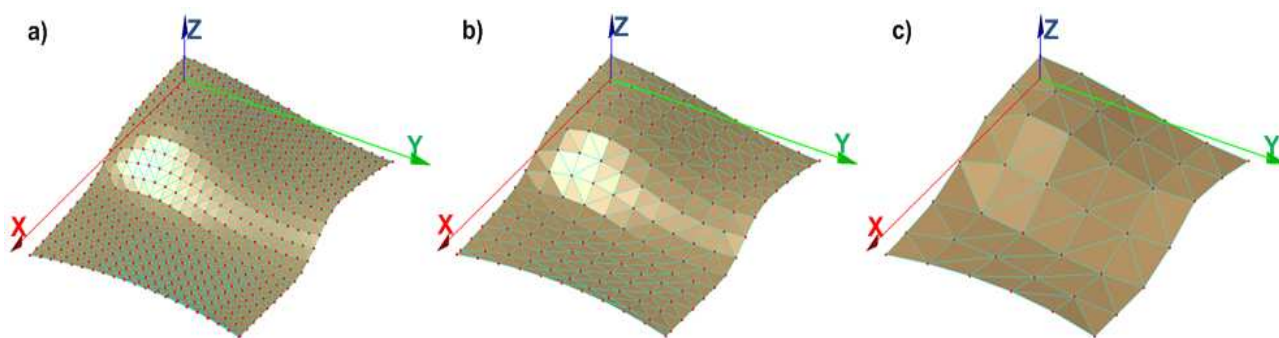
Przeprowadzono digitalizację powierzchni referencyjnej otrzymując 14 chmur punktów odwzorowujących ją z przyjętymi parametrami. Na rysunku 9 przedstawiono część otrzymanych chmur punktów.



Rys. 9. Otrzymane chmury punktów (oznaczenia wg tabeli 2): a) X5_Y3.5, b) X8_Y7, c) X20_Y14
Fig. 9. Point clouds (notation according to Table 2): a) X5_Y3.5, b) X8_Y7, c) X20_Y14

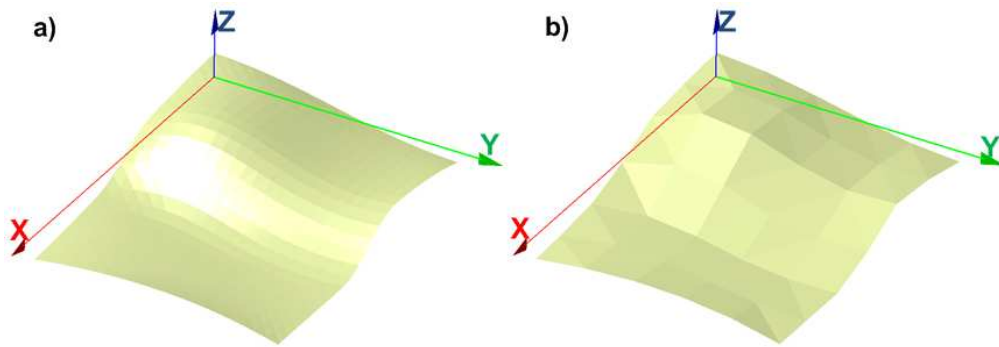
2.4. MODELOWANIE POWIERZCHNI

Przeprowadzono triangulację otrzymanych wcześniej chmur punktów. Wyniki triangulacji przedstawia rys. 10. Odtworzone powierzchnie będą oznaczane dalej tak jak odpowiadające im chmury punktów z dodanym symbolem „O_”.



Rys. 10. Odtworzone powierzchnie poprzez triangulację chmury punktów: a) O_X5_Y3.5, b) O_X8_Y7,
c) O_X20_Y14
Fig. 10. Triangulated point clouds: a) O_X5_Y3.5, b) O_X8_Y7, c) O_X20_Y14

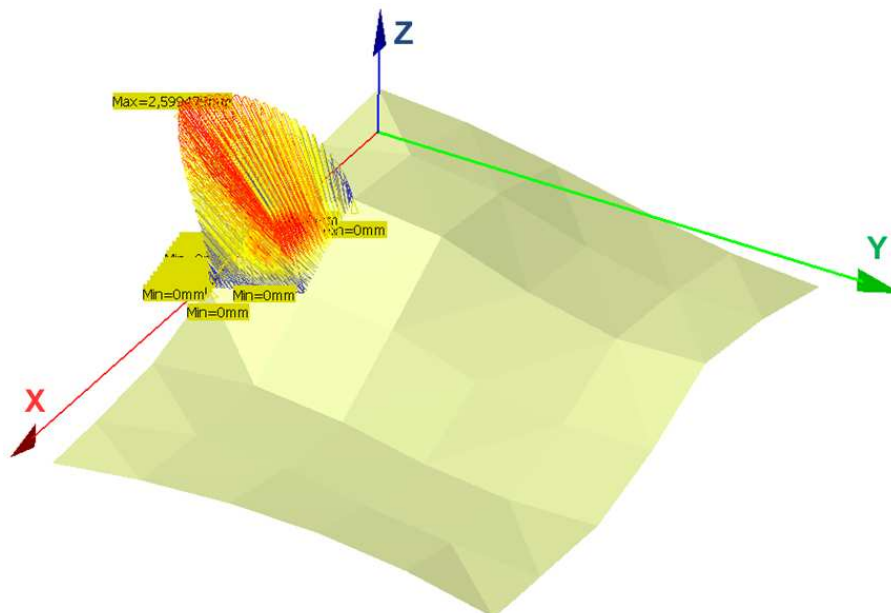
Jako, że powierzchnia utworzona przez triangulację chmury punktów nie może posłużyć do oceny różnic względem powierzchni referencyjnej, konieczna była zamiana poszczególnych trójkątów każdej powierzchni na płaszczyzny. Przykłady odtworzonych postaci powierzchni referencyjnej przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Odtworzone postaci powierzchni referencyjnej: a) O_X5_Y3.5, b) O_X20_Y14
 Fig. 11. Reconstructed form of reference free form surface: a) O_X5_Y3.5, b) O_X20_Y14

3. OCENA

W celu dokonania oceny różnic pomiędzy powierzchnią referencyjną a odtworzonymi w poprzednim kroku jej postaciami przeprowadzono analizę wstępną. Następnie w miejscach wykrycia największej różnicy analizę szczegółową, której przykład przedstawia rys. 12. Oceniana jest tutaj odległość od powierzchni referencyjnej do powierzchni odtworzonej, mierzona w wielu punktach w kierunku normalnym do powierzchni referencyjnej w danym punkcie.



Rys. 12. Przykład dokładnej analizy różnic pomiędzy powierzchnia referencyjną i odtworzoną O_X20_Y14 (na rysunku powierzchnia referencyjna nie została pokazana)

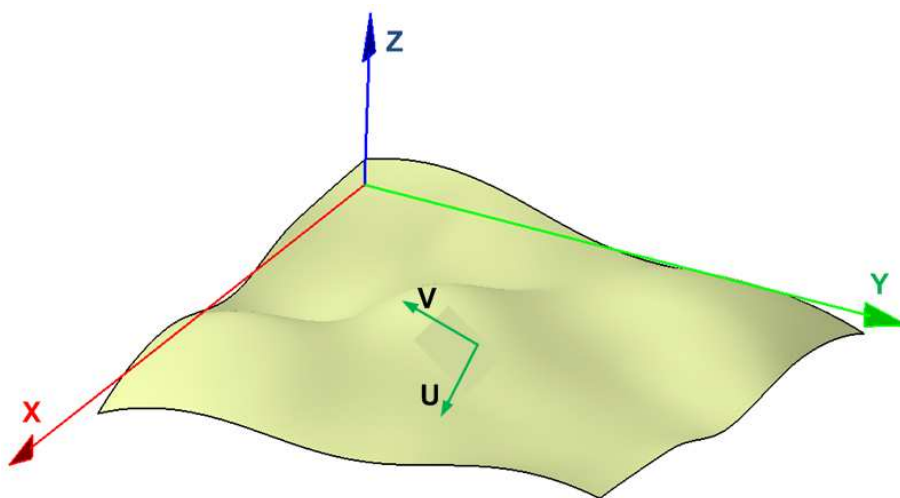
Fig. 12. Example of evaluation difference between reference and reconstructed (O_X20_Y14) surface (reference surface is hidden)

Otrzymane do tej pory wyniki zestawiono w tabeli 4. Największą bezwzględną wartość różnicy pomiędzy powierzchnią referencyjną i odtworzoną dla danej chmury punktów przyjęto oznaczać Błąd P.

Tabela 4. Zebrane wyniki ocen krzywych i powierzchni odtworzonych
Table 4. Evaluated difference between reconstructed curves and surfaces

Nr chmury punktów	Oznaczenie powierzchni odtworzonej	Błąd X mm	Błąd Y mm	Suma Błędu X i Błędu Y mm	Błąd P mm
1	O_X5_Y3.5	0.164394	0.056159	0.220553	0.223934
2	O_X5_Y5	0.164394	0.114037	0.278431	0.328433
3	O_X6_Y3.5	0.222948	0.056159	0.279107	0.283425
4	O_X6_Y5	0.222948	0.114037	0.336985	0.382172
5	O_X6_Y7	0.222948	0.223868	0.446816	0.541242
6	O_X8_Y5	0.406059	0.114037	0.520096	0.514327
7	O_X8_Y7	0.406059	0.223868	0.629927	0.648246
8	O_X8_Y10	0.406059	0.446079	0.852138	0.909055
9	O_X10_Y5	0.595931	0.114037	0.709968	0.703318
10	O_X10_Y7	0.595931	0.223868	0.819799	0.821476
11	O_X10_Y10	0.595931	0.446079	1.04201	1.108682
12	O_X15_Y10	0.742366	0.446079	1.188445	1.137027
13	O_X15_Y14	0.742366	0.88672	1.629086	1.836379
14	O_X20_Y14	1.499601	0.88672	2.386321	2.599478

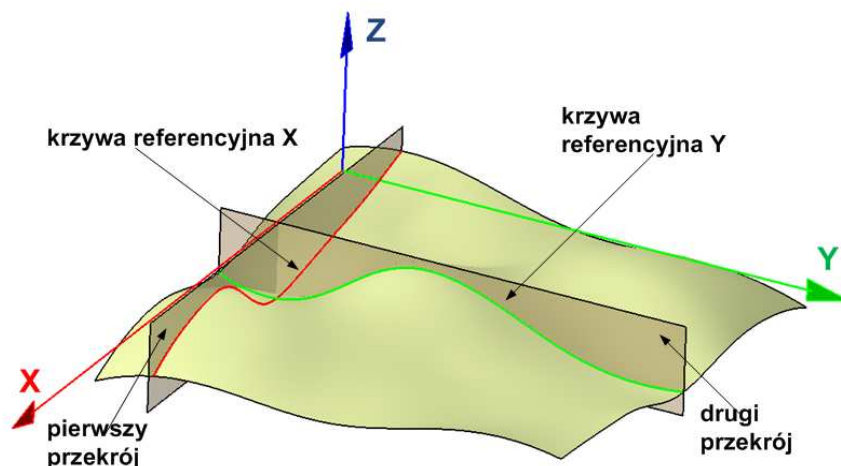
Zgodnie z przedstawionym tokiem postępowania przeprowadzono analizę dla kolejnej, przedstawionej na rys. 13 powierzchni swobodnej.



Rys. 13. Kolejna rozpatrywana referencyjna powierzchnia swobodna
Fig. 13. Second reference free form surface

Cechą charakterystyczną tej powierzchni jest to, że wyraźna zmiana krzywizny następuje w obydwu kierunkach – (U) osi X i (V) osi Y. Powierzchnia swobodna ma postać płyta prostokątnej o wymiarach 80 na 80mm. Wybór „płaszczyzny tnącej” oraz analiza

krzywizny zamodelowanej powierzchni referencyjnej pozwoliła na wybór z wcześniej opisywanymi warunkami dwóch przekrojów (drugi przekrój był równoległy do płaszczyzny prostopadłej do „płaszczyzny tnącej” i przechodził przez oś Z układu współrzędnych) i ich odwzorowanie w postaci krzywych, które stają się krzywymi referencyjnymi, nazywanymi dalej tak jak poprzednio krzywymi X i Y (rys. 14).



Rys. 14. Wybrane przekroje rozpatrywanej powierzchni
Fig. 14. Selected cross-sections of reference free form surface

Analogicznie jak poprzednio określono wartości parametrów digitalizacji rozpatrywanej powierzchni. W tabeli 5 przedstawiono oznaczenia zdigitalizowanych w postaci punktów krzywych X i Y oraz odpowiadające im parametry digitalizacji.

Tabela 5. Sposób oznaczania zdigitalizowanych krzywych X i Y w postaci punktów
Table 5. Notation of digitalized curves X and Y

L.p.	Krzywa X		Krzywa Y	
	Oznaczenie zdigitalizowanej krzywej X	Krok digitalizacji „k” mm	Oznaczenie zdigitalizowanej krzywej Y	Odległość pomiędzy liniami punktowania „d” mm
1	X4	2.824717167	Y2.5	2.5
2	X5	3.530896458	Y4	4
3	X6	4.23707575	Y5	5
4	X8	5.649434333	Y8	8
5	X10	7.061792917	Y10	10
6	X12	8.4741515	-	-

Z możliwych kombinacji parametrów digitalizacji wybrano czternaście – stanowiących czternaście różnych chmur punktów, których oznaczenia przedstawia tabela 6. Analogicznie jak poprzednio przeprowadzono digitalizację krzywych X i Y z określonymi parametrami, dokonano oceny różnic pomiędzy krzywymi X i Y a poszczególnymi krzywymi odtworzonymi, przeprowadzono digitalizację powierzchni referencyjnej,

wykonano triangulację otrzymanych chmur punktów oraz oceniono różnice pomiędzy powierzchnią referencyjną i powierzchniami odtworzonymi. Zachowano przyjęty w pierwszym przykładzie sposób oznaczania wyznaczanych wartości. Wszystkie otrzymane wyniki zawiera tabela 7.

Tabela 6. Symboliczne oznaczenia wybranych do dalszej analizy chmur punktów

Table 6. Symbolic notation of selected point clouds

Numer chmury punktów	Oznaczenie chmury punktów
1	X4_Y2.5
2	X4_Y4
3	X5_Y2.5
4	X5_Y4
5	X5_Y5
6	X6_Y2.5
7	X6_Y4
8	X6_Y5
9	X8_Y4
10	X8_Y5
11	X8_Y8
12	X10_Y5
13	X10_Y8
14	X12_Y10

Tabela 7. Zebrane wyniki ocen krzywych i powierzchni odtworzonych

Table 7. Evaluated difference between reconstructed curves and surfaces

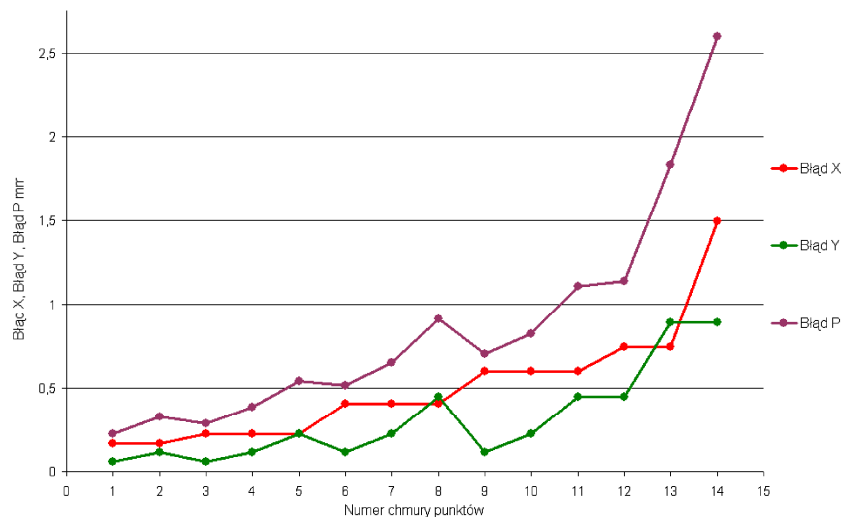
Nr chmury punktów	Oznaczenie powierzchni odtworzonej	Błąd X mm	Błąd Y mm	Suma Błędu X i Błędu Y mm	Błąd P mm
1	O_X4_Y2.5	0.100735	0.050335	0.15107	0.153601
2	O_X4_Y4	0.100735	0.125366	0.226101	0.24695
3	O_X5_Y2.5	0.153671	0.050335	0.204006	0.207336
4	O_X5_Y4	0.153671	0.125366	0.279037	0.281976
5	O_X5_Y5	0.153671	0.198797	0.352468	0.370876
6	O_X6_Y2.5	0.222192	0.050335	0.272527	0.269136
7	O_X6_Y4	0.222192	0.125366	0.347558	0.342487
8	O_X6_Y5	0.222192	0.198797	0.420989	0.412146
9	O_X8_Y4	0.339729	0.125366	0.465095	0.44105
10	O_X8_Y5	0.339729	0.198797	0.538526	0.523392
11	O_X8_Y8	0.339729	0.504938	0.844667	0.808324
12	O_X10_Y5	0.558072	0.198797	0.756869	0.704922
13	O_X10_Y8	0.558072	0.504938	1.06301	0.930129
14	O_X12_Y10	0.637764	0.715975	1.353739	1.373723

4. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

4.1. ANALIZA PIERWSZEJ POWIERZCHNI REFERENCYJNEJ

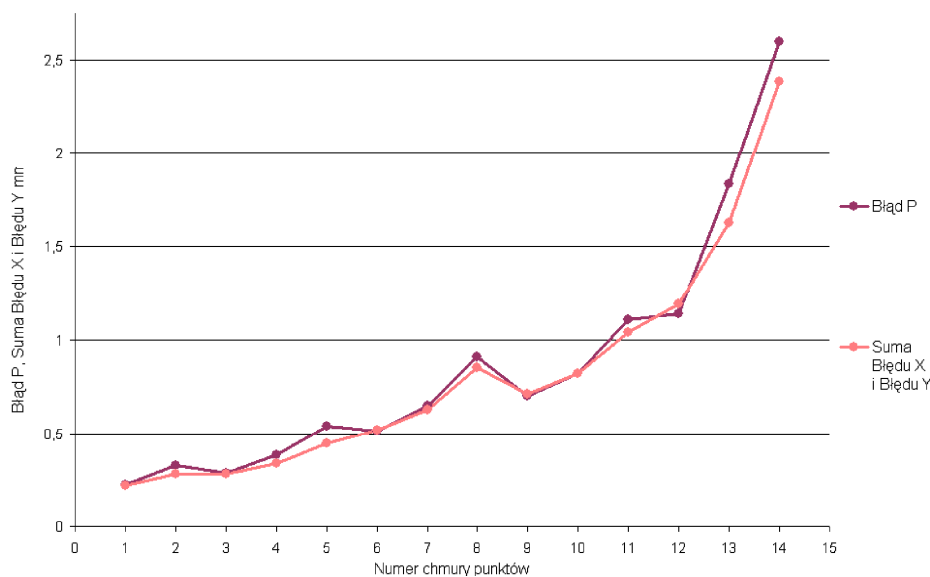
Dane z tabeli 4 przedstawiono w postaci wykresu na rysunku 15. Analizując powyższe dane można stwierdzić, że zwiększanie wartości parametrów digitalizacji powoduje

zwiększanie Błędu P w sposób wykładniczy. Jest to analogiczne z charakterem przyrostu przyjętych wartości obydwu parametrów digitalizacji. Analizując korelację liniową pomiędzy Błędem X i Błędem P, oraz Błędem Y i Błędem P można stwierdzić występowanie silnych zależności. Odpowiednie współczynniki korelacji liniowej przyjmują wartości 0.94 i 0.95.



Rys. 15. Wartości Błędu X, Błędu Y, Błędu P dla kolejnych chmur punktów
 Fig. 15. Values of Error X, Error Y, Error P for following point clouds

Stosując test t można wykazać, że obie korelacje są istotne na poziomie 0.01 (hipotezę, że nie ma korelacji można odrzucić z szansą popełnienia błędu równą 1%) [2]. Można zauważyć dużą zgodność (co do wartości) Błędu P z sumą poszczególnych Błędów X i Y, co pokazuje rysunek 16.



Rys. 16. Wartość Błędu P oraz sumy Błędu X i Błędu Y dla kolejnych chmur punktów
 Fig. 16. Values of Error P and sum of Error X and Y for following point clouds

Analizując korelację liniową pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y oraz Błędem P można stwierdzić występowanie bardzo silnej zależności. Współczynnik korelacji liniowej przyjmuje wartość 0.99. Stosując test t można wykazać, że korelacja jest istotna na poziomie 0.01. Model A zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y a Błędem P przyjmuje następującą postać:

$$BP_{XY} = a_2 \cdot BXY + b_2$$

$$a_2 = 1.088; b_2 = -0.021$$

99 procentowy przedział ufności dla b_2 [3] wynosi od 0.812 do 0.908

99 procentowy przedział ufności dla a_2 wynosi od 1.005 do 1.17

$$r_{BPXY} = 0.99$$

gdzie:

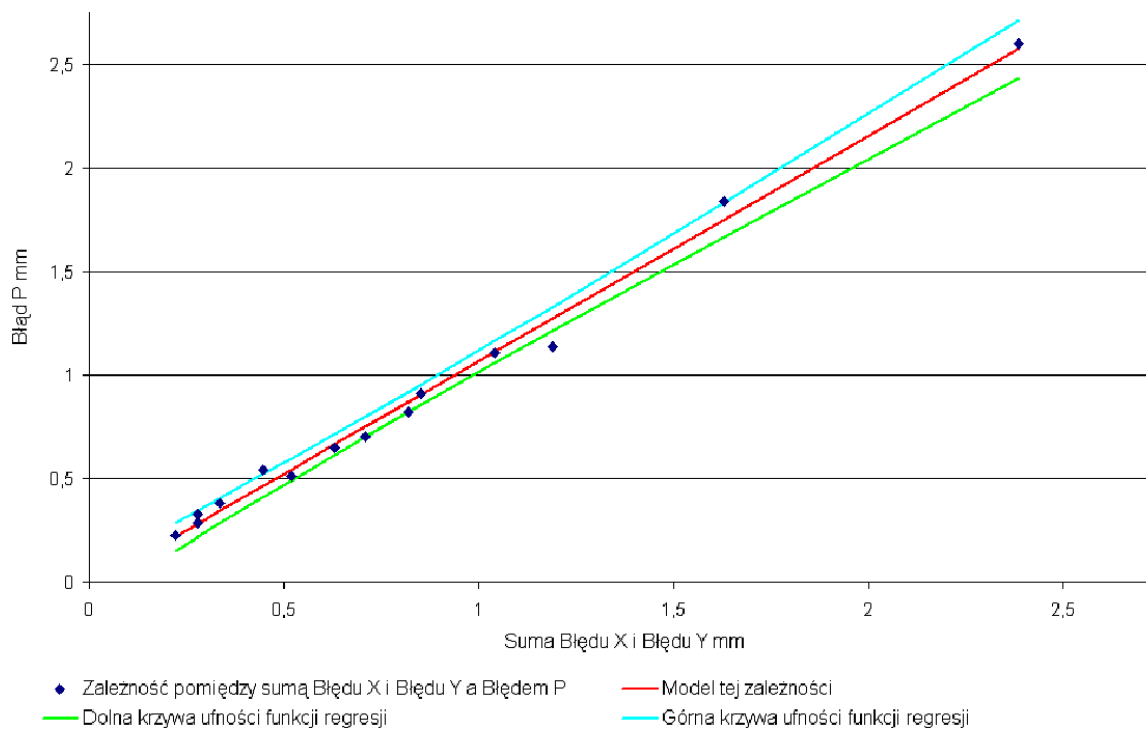
BP_{XY} – model A zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P,

r_{BPXY} – współczynnik korelacji liniowej pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P dla modelu A,

BXY – suma Błędu X i Błędu Y,

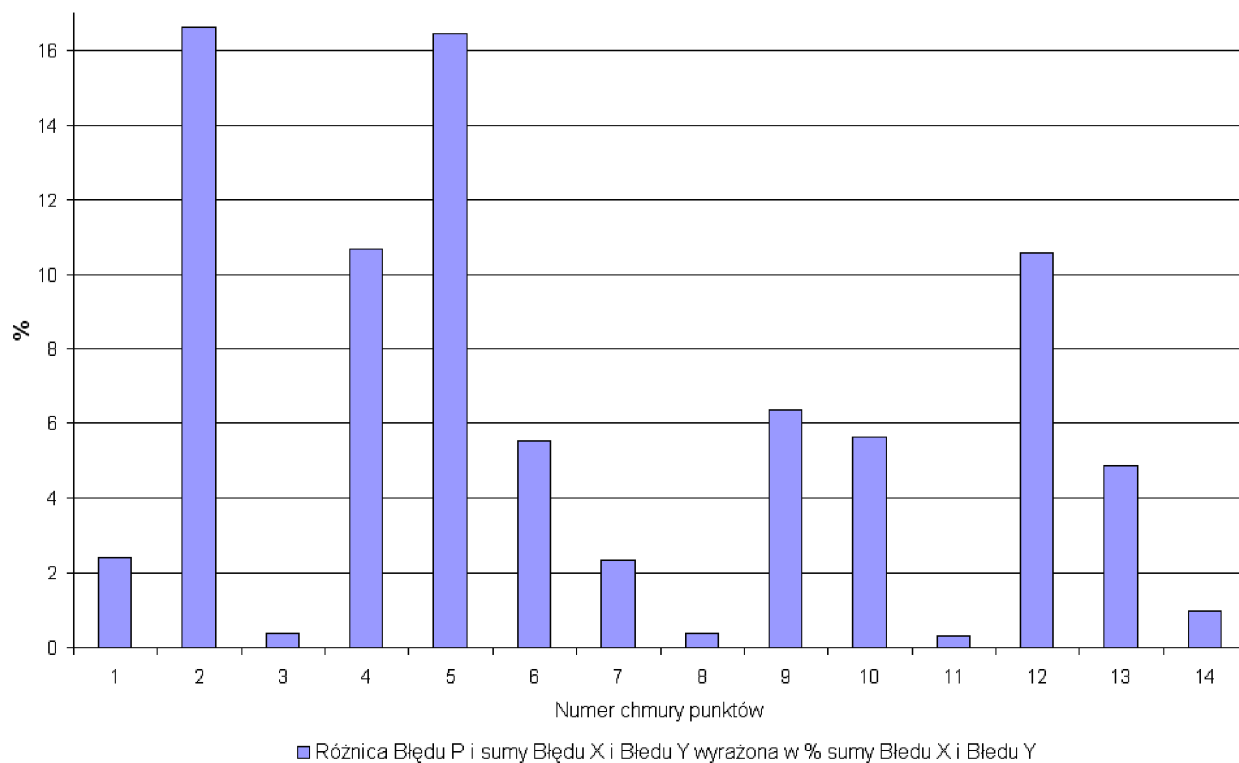
a_2, b_2 – współczynniki regresji liniowej.

Przedstawia to poniższy wykres (rys. 17).



Rys. 17. Model A zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y, a Błędem P
Fig. 17. Model A of relationship between sum of Error X and Y, and Error P

Dla takiego modelu maksymalna bezwzględna wartość różnicy („niezgodność”), pomiędzy wartością Błędu P a wyznaczonym, jako suma Błędu X i Błędu Y jego odpowiednikiem, wynosi około 17% (średnia 6%) sumy Błędu X i Błędu Y, co przedstawia rysunek 18.



Rys. 18. Bezwzględne wartości różnic pomiędzy Błędem P i sumą Błędu X i Błędu Y, wyrażone w procentach sumy Błędu X i Błędu Y dla modelu A

Fig. 18. Absolute values of difference between Error P and sum of Error X and Y, in form of percentage value of sum Error X and Y for Model A

Przeprowadzono test istotności współczynnika regresji liniowej a_2 (wartość statystyki $t=3.259$, $n-2=12$ stopni swobody) rozważanego modelu. Przy postawieniu hipotezy zerowej $H_0 : a_2 = 1$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1 : a_2 > 1$ wykazał on, że na poziomie istotności 0.01 hipotezę zerową należy odrzucić, co oznacza, iż istotnie (na 99%) współczynnik regresji liniowej rozważanego modelu jest różny od 1 (odrzucając hipotezę zerową istnieje tylko 1%-owe prawdopodobieństwo popełnienia błędu). Przyjmując model B zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędem P (rys. 19) w postaci:

$$BP_{XY} = a_3 \cdot BXY + b_3$$

$$a_3 = 1; b_3 = 0$$

99 procentowy przedział ufności dla b_3 wynosi od 0.78 do 0.939

99 procentowy przedział ufności dla a_3 wynosi od 0.864 do 1.136

$$r_{BPXY} = 0.99$$

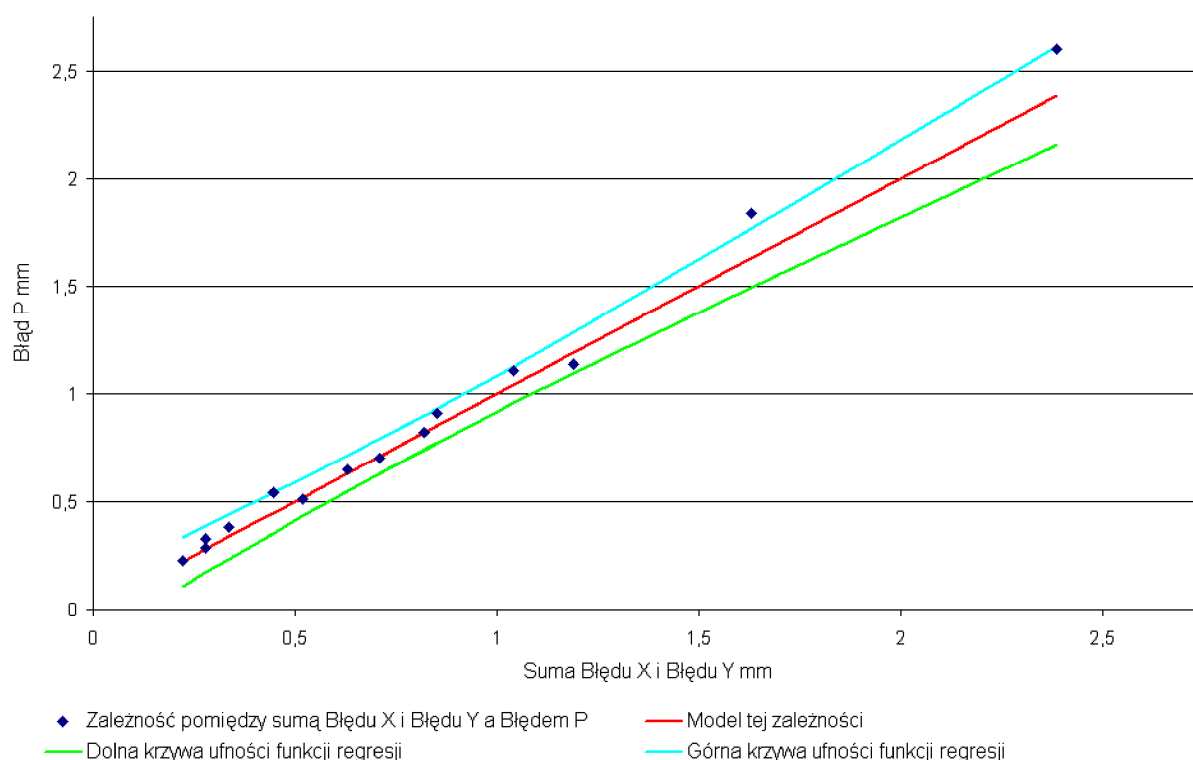
gdzie:

BP_{XY} – model B zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P,

r_{BPXY} – współczynnik korelacji liniowej pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P dla modelu B,

BXY – suma Błędu X i Błędu Y,

a_3, b_3 – współczynniki modelu liniowego.

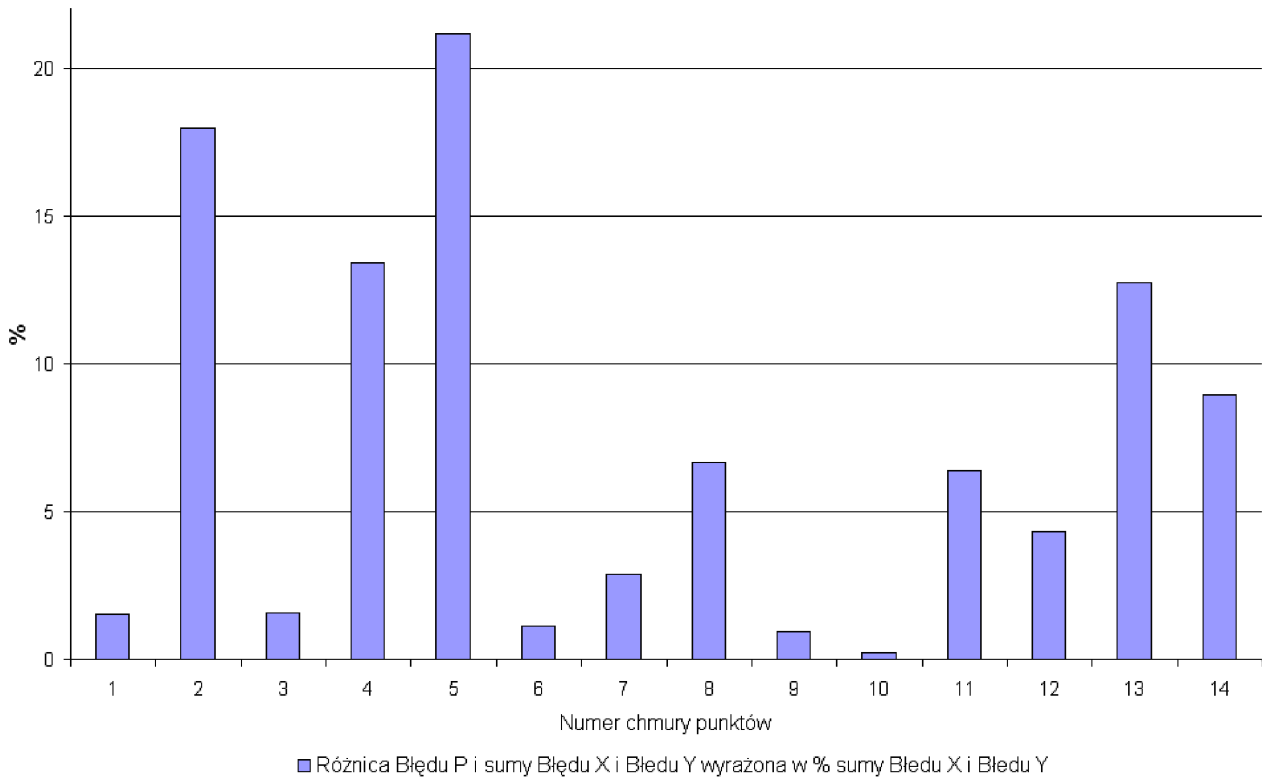


Rys. 19. Model B zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędem Y, a Błędem P
Fig. 19. Model B of relationship between sum of Error X and Y, and Error P

maksymalna bezwzględna wartość różnicy („niezgodność”), pomiędzy wartością Błędu P a wyznaczonym jako suma Błędu X i Błędu Y jego odpowiednikiem, wynosi około 21% (średnia 7%) sumy Błędu X i Błędu Y, co przedstawia rysunek 20.

4.2. ANALIZA DRUGIEJ POWIERZCHNI REFERENCYJNEJ

Analizując korelację liniową pomiędzy Błędem X i Błędem P, oraz Błędem Y i Błędem P można stwierdzić występowanie silnych zależności. Odpowiednie współczynniki korelacji liniowej przyjmują wartości 0.91 i 0.95. Stosując test t można wykazać, że obie korelacje są istotne na poziomie 0.01.



Rys. 20. Bezwzględne wartości różnic pomiędzy Błędem P i sumą Błędu X i Błędu Y, wyrażone w procentach sumy Błędu X i Błędu Y dla modelu B

Fig. 20. Absolute values of difference between Error P and sum of Error X and Y, in form of percentage value of sum Error X and Y for Model A

Analizując korelację liniową pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y, oraz Błędem P można stwierdzić występowanie bardzo silnej zależności. Współczynnik korelacji liniowej przyjmuje wartość 0.99, a stosując test t można wykazać, że korelacja jest istotna na poziomie 0.01. Model C zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y a Błędem P przyjmuje następującą postać:

$$BP_{XY} = a_6 \cdot BXY + b_6$$

$$a_6 = 0.947; b_6 = 0.012$$

99 procentowy przedział ufności dla b_6 wynosi od 0.475 do 0.534

99 procentowy przedział ufności dla a_6 wynosi od 0.86 do 1.034

$$r_{BPXY} = 0.99$$

gdzie:

BP_{XY} – model C zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P,

r_{BPXY} – współczynnik korelacji liniowej pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P dla modelu C,

BXY – suma Błędu X i Błędu Y,
 a_6, b_6 – współczynniki regresji liniowej.

Dla takiego modelu maksymalna bezwzględna wartość różnicy („niezgodność”), pomiędzy wartością Błędu P a wyznaczonym, jako suma Błędu X i Błędu Y jego odpowiednikiem, wynosi około 9% (średnia 3%) sumy Błędu X i Błędu Y. Przeprowadzono test istotności współczynnika regresji liniowej a_6 (wartość statystyki $|t| = 1.866$, $n - 2 = 12$ stopni swobody) rozważanego modelu. Przy postawieniu hipotezy zerowej $H_0 : a_6 = 1$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1 : a_6 < 1$ wykazał on, że na poziomie istotności 0.2 hipotezę zerową można odrzucić. Oznacza to, że na 80% można mieć pewność, że współczynnik regresji liniowej jest różny od 1. Przyjmując model D zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y a Błędem P w postaci:

$$BP_{XY} = a_7 \cdot BXY + b_7$$

$$a_7 = 1; b_7 = 0$$

99 procentowy przedział ufności dla b_7 wynosi od 0.468 do 0.541

99 procentowy przedział ufności dla a_7 wynosi od 0.894 do 1.105

$$r_{BPXY} = 0.99$$

gdzie:

BP_{XY} – model D zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P,

r_{BPXY} – współczynnik korelacji liniowej pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y i Błędem P dla modelu D,

BXY – suma Błędu X i Błędu Y,

a_7, b_7 – współczynniki modelu liniowego.

Maksymalna bezwzględna wartość różnicy („niezgodność”), pomiędzy wartością Błędu P a wyznaczonym jako suma Błędu X i Błędu Y jego odpowiednikiem, wynosi 12,5% (średnia 4%) sumy Błędu X i Błędu Y.

5. WNIOSKI

Otrzymane wyniki z dwóch zdecydowanie różnych przykładów powierzchni swobodnych weryfikują postawioną hipotezę: wartość błędu odtworzenia powierzchni swobodnej referencyjnej jest uzależniona od błędów, jakie powstaną przy odtwarzaniu krzywych X i Y, dla różnych liczb punktów, a zatem dla różnych parametrów digitalizacji. Dane w modelach A i C są bardzo silnie skorelowane, a zatem istnieje bardzo silna zależność pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y a Błędem P. Postacie tych zależności dla obydwu przypadków są podobne – współczynniki kierunkowe przyjmują wartości bliskie 1 a wyrazy wolne bliskie 0. Jednocześnie przeprowadzone testy t w obydwu przypadkach

wykazują istotną odmienną wartość współczynników kierunkowych od 1. Może to świadczyć o istnieniu dodatkowego czynnika wpływającego na rzeczywistą wartość błędu odtworzenia powierzchni referencyjnej.

Dla szacowania wartości błędu odtworzenia powierzchni swobodnej proponuje się następujące możliwości:

- znalezienie czynnika wpływającego na postać modelu zależności pomiędzy sumą Błędu X i Błędu Y a Błędem P,
- stosowanie uzyskanych modeli A i C dla powierzchni swobodnych o podobnych kształtach, licząc się w pierwszym przypadku z możliwością popełnienia 17%, a drugim przypadku 9% błędu,
- przyjmowanie, że wartość sumy Błędu X i Błędu Y równa jest rzeczywistej wartości błędu odtworzenia powierzchni swobodnej, licząc się z możliwością popełnienia błędu nie mniejszego niż 12.5%.

LITERATURA

- [1] PUTZ B., 2004, *Od G0 do G3 – klasy gładkości w projektowaniu i stylizacji powierzchni*, Mechanik, 11.
- [2] VOLK W., 1973, *Statystyka stosowana dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.
- [3] KOSMOL J., 2010, *Wybrane zagadnienia metodologii badań*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

ATTEMPT TO VERIFY THE METHOD OF PARAMETERS SELECTION FOR DIGITIZATION OF FREE FORM SURFACE FOR REVERSE ENGINEERING IN CATIA V5

The paper present attempt to verify the method, which goal will be to allow estimation about accuracy of reconstruction free form surface from point cloud. Point cloud which is used can consist of different numbers of points, depending on parameters of digitization (step and distance between lines of probing). In assumption the method consist of four stages: 1) preliminary measurement, 2) data analysis, which gives information about parameters of digitization, predicted deviation for these parameters, 3) digitization for selected parameters, 4) reconstruction of the free form surface. All activities related to verification of the method will be implemented in CATIA V5. Point clouds in a digitization stage will be generated similarly to the strategy offered by the PowerINSPECT 4.16 measuring software. Positive verification of the method of parameters selection for digitization free form surfaces will enable make further investigation with measurement carried out on the coordinate measuring machine.