

Karol STASIŃSKI

karol.stasinski@gmail.com

Ireneusz J. JÓŹWIAK

Politechnika Wrocławska

Wydział Informatyki i Zarządzania

ireneusz.jozwiak@pwr.edu.pl

## STRATEGIE MORFINGU OBIEKTÓW W GRAFICE KOMPUTEROWEJ

**Streszczenie.** W artykule omówiono strategie morfingu obiektów dwuwymiarowych w celu uzyskania efektu płynnego przejścia pomiędzy zadanymi kształtami. Pośrednie figury przejściowe generowane są na podstawie aproksymacji krzywej łamanej opisującej dany obiekt. Strategie oparto na metodach całkowicie automatycznych oraz wymagających nadzoru człowieka – metodach półautomatycznych.

**Słowa kluczowe:** obiekt dwuwymiarowy, morfing, grafika komputerowa.

## TWO-DIMENSIONAL OBJECT MORPHING STRATEGIES IN COMPUTER GRAPHICS

**Summary.** The paper describes the strategies of generation of two-dimensional objects in order to achieve smooth transition animation between two given shapes. The generated figures are calculated based on polygonal chain approximation that describes input figures. Described strategies involve automatic and semiautomatic algorithms. The article suggests the new method enhancement for existing 2D object morphing.

**Keywords:** two-dimensional object, computer graphics, morphing.

### 1. Wprowadzenie

Rekonstrukcja obiektów trójwymiarowych na podstawie zbiorów płaskich modeli dwuwymiarowych od lat jest tematem badań naukowych podejmowanych w ramach wielu

dziedzin. Rozwój prac związanych ze strategiami rekonstrukcji i opisu struktur przestrzennych dojrzeła wraz ze wzrostem wydajności infrastruktury obliczeniowej, narzędzi używanych przy rejestracji lub tworzeniu opisów tych struktur oraz technologii. W ostatnich latach opracowano wiele metod digitalizacji modeli obiektów fizycznych wspólnie nazywanych skanowaniem 2D dla obiektów płaskich i 3D dla pozostałych przypadków. Efektem rozpoznania mogą być uporządkowane zbiory punktów nazywane chmurą punktów lub figur [1], [2]. Przykładem źródła takich danych są zdjęcia tomografii komputerowej (ang. *CT*) [3] czy rezonansu magnetycznego (ang. *MRI*) [4]. Dokładność zbiorów danych może być różna w zależności od techniki pomiarowej oraz stosowanych narzędzi. Problemem, jaki pozostaje do rozwiązania, jest sposób połączenia dwóch warstw rekonstruowanego obiektu, tak by łączenie wyglądało naturalnie i oddawało wygląd obiektu rzeczywistego [5].

Celem niniejszego artykułu jest prezentacja istniejących strategii wyznaczania modeli obiektów dwuwymiarowych będących stanami pośrednimi przejścia dla zadanych figur oraz zbadanie możliwości zastosowania złożenia istniejących już metod do ulepszenia opisów przestrzennych generowanych przejść.

Do badań jako obiekt wizualizacji zastosowano zestaw figur o różnym stopniu szczegółowości. Opis wykorzystanych modeli stanowi zbiór punktów oraz krawędzi je łączących. Takie podejście pozwoliło na jakościowe porównanie efektów każdej z omówionych technik.

## 2. Stosowane metody morfingu obiektów dwuwymiarowych

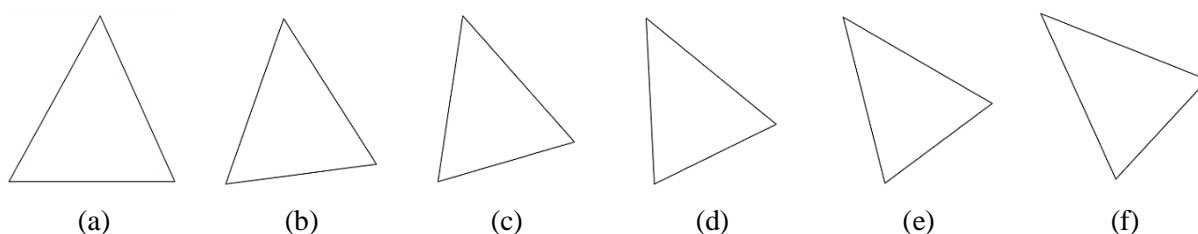
W literaturze przedmiotu wyróżnia się kilka strategii rekonstrukcji obiektów dwuwymiarowych [5], [6], [7]. Najbardziej znanymi, powszechnie stosowanymi i nieobjętymi prawami patentowymi są następujące metody, zwane strategiami rekonstrukcji obiektów:

- Interpolacja kształtu.
- Spłaszczony model Gaussa.
- Macierz przekształceń.

### Ad 1. Interpolacja kształtu

Interpolacja kształtu to strategia oparta na numerycznej metodzie interpolacji. W matematyce interpolacja polega na wyznaczeniu tak zwanej funkcji interpolacyjnej, która dla zadanych punktów przyjmuje z góry zadane wartości. W pozostałych punktach wartości są aproksymowane na podstawie przyjętej funkcji. Istnieje wiele rodzin funkcji, które mogą służyć do wyznaczenia poszukiwanej funkcji interpolacyjnej, dlatego mówi się o interpolacji liniowej, wielomianowej czy sklejaney [8], [9]. W przypadku omawianej strategii najczęściej

stosowaną metodą interpolacji jest interpolacja liniowa, przez wzgląd na prostotę jej implementacji, szybkość działania i możliwość stosowania jej we w pełni automatycznym przekształcaniu. W ramach strategii interpolacji kształtu z góry zadanymi wartościami jest para punktów z figury źródłowej i docelowej. Dla każdej pary punktów wyznacza się osobną funkcję interpolacji, która może, ale nie musi zależeć od położenia innych punktów [10], [11]. Jednakże zdefiniowanie takiej zależności oraz wyznaczenie punktów sobie odpowiadających na figurach jest zadaniem wymagającym interakcji człowieka. Zaletą tej techniki jest duża szybkość działania i stosunkowo wysoka elastyczność, zważywszy na fakt możliwych do zdefiniowania zależności. Jej wadami natomiast są konieczność interakcji z człowiekiem w celu definicji punktów i powiązań oraz fakt, że zbiory punktów i krawędzi opisujących figury źródłową i docelową muszą być równoliczne. Wynik zastosowania tej metody w celu wygenerowania pośrednich obiektów przejściowych zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Morfing z zastosowaniem interpolacji kształtu, gdzie: (a) – trójkąt (figura źródłowa), (b-e) – figury wygenerowane za pomocą algorytmu morfingu przy wykorzystaniu interpolacji kształtu, (f) – trójkąt (figura docelowa)

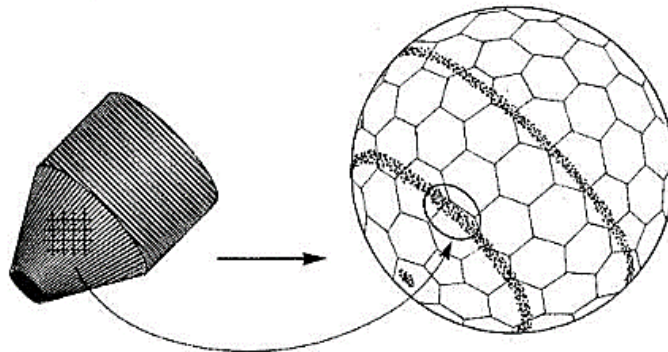
Fig. 1. Morphing with shape interpolation method, where: (a) – triangle (source object), (b-e) – objects generated by morphing algorithm of shape interpolation, (f) – triangle (target object)

Źródło: Opracowanie własne.

## Ad 2. Spłaszczony model Gaussa

Strategia morfingu z zastosowaniem modelu Gaussa opiera się na wygenerowaniu rozszerzonych modeli Gaussa (ang. *Extended Gaussian Image*) [12], [13] i znalezieniu funkcji interpolacji dla przejścia pomiędzy wygenerowanymi opisami [14]. Ze względu na to, że model Gaussa stosuje się do opisu obiektów trójwymiarowych, w literaturze metoda ta nazywana jest spłaszczonym modelem Gaussa (ang. *Flattened Gaussian Image*) [15] lub kołowym modelem Gaussa (ang. *Circular Gaussian Image*) [16] w celu podkreślenia, że dotyczy ona dwuwymiarowej techniki [16]. Model Gaussa zakłada, że dla dowolnego obiektu każda ściana, będąca płaszczyzną w modelu 3D lub odcinkiem w modelu 2D, może być opisana wektorem normalnym do powierzchni na kuli jednostkowej. Dodatkowo opis ten jest rozszerzany o informację o rozmiarze ściany, odpowiednio powierzchni i długości dla modeli 3D i 2D. Informacja o rozmiarze ściany reprezentowana jest przez długość wektora równoległego do normalnej reprezentującej ścianę opisywaną [17]. W literaturze długość wektora opisującego rozmiar ściany jest również nazywany jego masą (ang. *mass*).

W rezultacie dla przedmiotu opisanego tą techniką dostajemy wielowymiarowy histogram reprezentujący ten przedmiot. Przykład obiektu opisanego za pomocą rozszerzonego modelu Gaussa prezentuje rysunek 2.



Rys. 2. Obiekt opisany na kuli jednostkowej. Punkty na kuli reprezentują wektory opisujące ściany obiektu

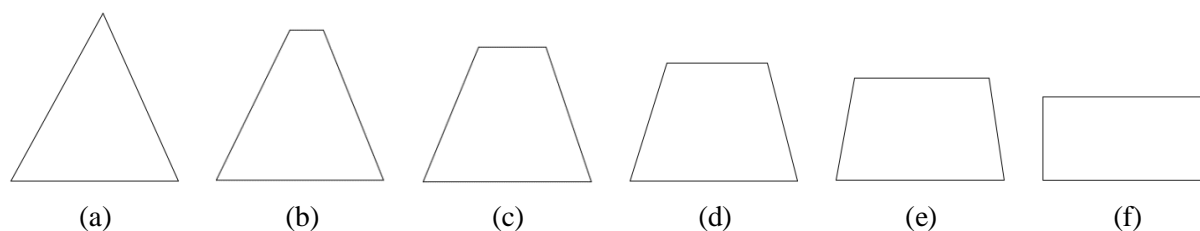
Fig. 2. Object described on unit sphere (Gaussian Image). Points on sphere represents wall describing vectors

Źródło: Computer Vision [12].

Następnie na podstawie otrzymanych histogramów generuje się histogramy reprezentujące stany przejściowe modelowanego obiektu z zastosowaniem predefiniowanej funkcji interpolacji. Na końcu dla wygenerowanych opisów stanów figur pośrednich przekształca się je do właściwej, geometrycznej reprezentacji. Do zalet tej metody należą elastyczność, możliwość konfiguracji za pomocą zadanej funkcji interpolacji i pełna automatyczność. Wadą tej metody jest fakt, że można ją stosować jedynie w przypadku obiektów wypukłych. Ograniczenie to wynika z przyjętego modelu reprezentacji histogramu. Wszystkie informacje nanoszone są w formie wektorów na wypukły obiekt, którym jest kula. Powoduje to, że każdy wklęsły obiekt zostanie uwypuklony, a w rezultacie zniekształcony. Wynik zastosowania tej metody w celu wygenerowania pośrednich obiektów przejściowych zaprezentowano na rysunku 3.

### Ad 3. Macierz przekształceń

Strategia morfingu przy wykorzystaniu macierzy przekształceń opiera się na morfingu z zastosowaniem siatki dla obrazów rastrowych, jednak w przypadku metody omawianej w artykule przekształcenia dotyczą reprezentacji wektorowej obrazu. Technika ta polega na nałożeniu na przekształcaną figurę siatki, co zaprezentowano na rysunku 4. Następnie każde z pól siatki jest modyfikowane przy użyciu przekształceń afinicznych [18]. W celu uzyskania stanów pośrednich przejścia pomiędzy figurą źródłową a docelową na każdą z figur nakłada się siatkę o jednakowej gęstości. Dla tak uzyskanych opisów wyznacza się pary pól na siatkach.

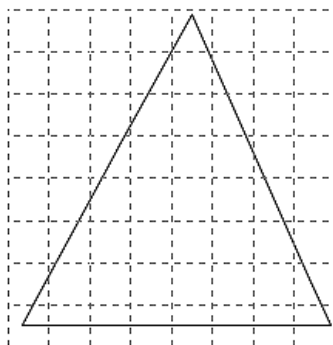


Rys. 3. Morfing z zastosowaniem modelu Gaussa, gdzie: (a) – trójkąt (figura źródłowa), (b-e) – figury wygenerowane za pomocą algorytmu morfingu przy wykorzystaniu modelu Gaussa, (f) – prostokąt (figura docelowa)

Fig. 3. Morphing with Gaussian Image transform method, where: (a) – triangle (source object), (b-e) – objects generated by morphing algorithm of Gaussian Image transform method, (f) – rectangle (target object)

Źródło: Opracowanie własne.

Pierwszy element dwójki to pole należące do siatki figury źródłowej, który ma takie samo położenie jak pole będące drugim elementem, należącym do siatki wygenerowanej dla figury docelowej. W literaturze taką parę pól nazywa się polami odpowiadającymi [19]. Dla każdej odpowiadającej dwójki generuje się przekształcenia reprezentujące stany przejściowe modelowanego obiektu z zastosowaniem predefiniowanej funkcji interpolacji, która może, ale nie musi uwzględniać stan innych pól na siatce źródłowej i docelowej. Na końcu, stosując na siatce otrzymane przekształcenia pośrednie, modyfikuje się figurę źródłową, a w wyniku dostaje się geometryczną reprezentację stanu przejściowego pomiędzy modelami wejściowym i wyjściowym [20], [21].



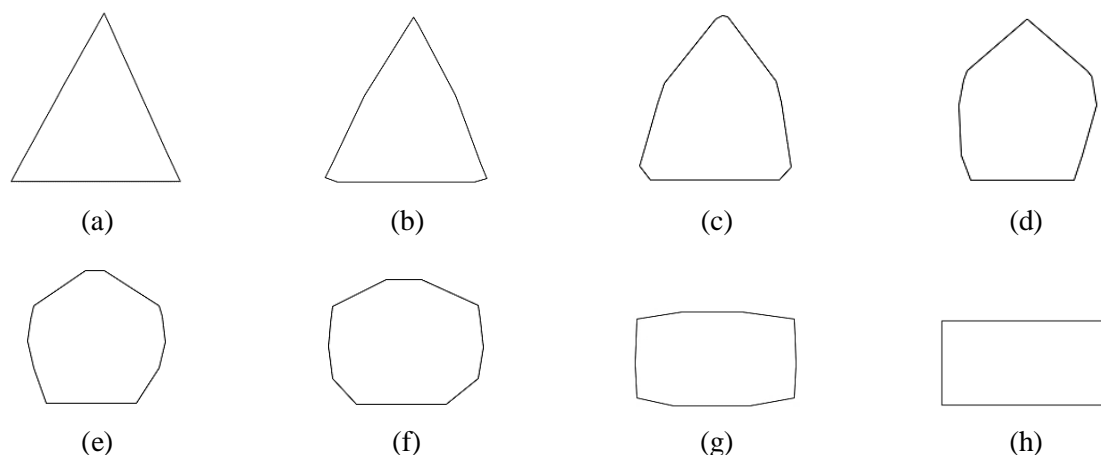
Rys. 4. Trójkąt z nałożoną siatką reprezentującą macierz przekształceń

Fig. 4. Triangle on transformation matrix grid

Źródło: Opracowanie własne.

Ograniczeniem strategii jest konieczność, aby w jednym polu pozostawały maksymalnie trzy punkty należące do figury. W przeciwnym wypadku może wystąpić problem nieciągłości krawędzi w przypadku przekształcenia. Oznacza to zatem, że dla wysoce nierównych krawędzi i obiektów o wysokiej szczegółowości nałożona siatka musi być bardzo gęsta, co zwiększa nakład obliczeniowy wymagany do wykonania morfingu. Zaletą tej metody jest

elastyczność konfiguracji funkcji interpolującej i automatyczność. Do wad tej techniki można zaliczyć ograniczenie gęstości siatki ze względu na szczegółowość obiektu, konieczność kontroli ciągłości krawędzi w trakcie przekształcania i rosnącą złożoność obliczeniową w przypadku nierównych obiektów. Przykład zastosowania tej metody w morfingu prezentuje rysunek 5.



Rys. 5. Morfing z zastosowaniem macierzy przekształceń, gdzie: (a) – trójkąt (figura źródłowa), (b-g) – figury wygenerowane za pomocą algorytmu morfingu przy wykorzystaniu macierzy przekształceń, (h) – prostokąt (figura docelowa)

Fig. 5. Morphing with transformation matrix method, where: (a) – triangle (source object), (b-g) – objects generated by morphing algorithm of transformation matrix, (h) – rectangle (target object)

Źródło: Opracowanie własne.

### 3. Strategie morfingu obiektów dwuwymiarowych

Spośród trzech wymienionych powyżej technik morfingu obiektów dwuwymiarowych wybrano metodę morfingu z zastosowaniem modelu Gaussa i wzbogacono ją o programowanie dynamiczne. Kryterium wyboru metody była największa elastyczność z punktu widzenia ustawień początkowych. Dodatkowo przyjęto, że strategia musi być automatyczna.

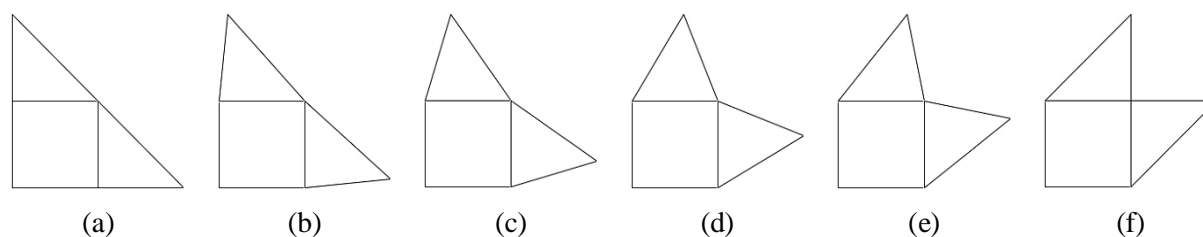
Badana w niniejszej pracy strategia generowania przejść pomiędzy figurami płaskimi proponuje metodę morfingu z zastosowaniem modelu Gaussa wzbogaconą o programowanie dynamiczne. Przeprowadzona powyżej analiza technik generowania pośrednich stanów przejściowych dla obiektów dwuwymiarowych pozwala zauważyć, że metoda morfingu z zastosowaniem modelu Gaussa daje dobry efekt tylko w przypadku figur wypukłych. Istotnym ograniczeniem tego algorytmu jest fakt, że w wyniku generowania rozszerzonego modelu Gaussa dla figury wklęsłej zostanie ona zniekształcona ze względu na przyjętą

reprezentację diagramu. Każdy zbiór wklęsły można przedstawić za pomocą zestawu zbiorów wypukłych (simpleksów).

Odwołując się do stosowanej w grafice trójwymiarowej techniki kompozycji brył CSG (ang. *Constructive Solid Geometry*), polegającej na przedstawieniu bryły jako wyniku regularyzowanych działań boolowskich, animowany obiekt dwuwymiarowy można przedstawić jako sumę figur wypukłych. Reprezentacja ta umożliwia wygenerowanie pośrednich modeli bez zniekształcania żadnego z nich, natomiast ich suma jest aktualnym stanem przejściowym dla rozpatrywanej figury.

Powstały problem wyznaczania figur wypukłych będących składowymi figury docelowej można rozwiązać za pomocą strategii stosowanych w przypadku zagadnień optymalizacyjnych. Jedną z najpopularniejszych technik tej klasy, a jednocześnie dobrze wpisującą się w naturę rozpatrywanego problemu, jest programowanie dynamiczne. Opiera się ono bowiem na podziale rozwiązywanego problemu na podproblemy względem kilku parametrów. W odróżnieniu od innych technik tej klasy, jak np. dziel i zwyciężaj, problemy te nie muszą pozostawać rozłączne, ale ich optymalne rozwiązania muszą być jednocześnie rozwiązaniem optymalnym dla podstruktury. Dodatkowo programowanie dynamiczne jest stosowane zwykle w problemach, w których zastosowanie metody przeglądu zupełnego (ang. *exhaustive search*), zwanej metodą siłową (ang. *brute-force search*), prowadzi do ponadwielomianowej liczby rozwiązań, podczas gdy liczba różnych rozwiązań podproblemów jest wielomianowa.

W przypadku problemu podziału figury można zidentyfikować następujące kryteria: powierzchnia figury składowej, liczba figur składowych, złożoność figur składowych w rozumieniu liczby wierzchołków. Rozwiązaniem optymalnym jest minimum globalne dla wszystkich podanych parametrów. Wygenerowane w ten sposób figury składowe mogą zastać przekształcone bez straty informacji o wklęsłości figury, która jest wynikiem ich złożenia. Przykład zastosowania tej metody w morfingu prezentuje rysunek 6.



Rys. 6. Morfing z zastosowaniem modelu Gaussa wzbogaconego o programowanie dynamiczne, gdzie: (a) – trójkąt (figura źródłowa), (b-e) – figury wygenerowane za pomocą algorytmu morfingu przy wykorzystaniu modelu Gaussa wzbogaconego o programowanie dynamiczne, (f) – obiekt wklęsły (figura docelowa)

Fig. 6. Morphing with Gaussian Image transform method extended by dynamic programming, where: (a) – triangle (source object), (b-e) – objects generated by morphing algorithm of Gaussian Image transform method extended by dynamic programming, (f) – concave figure (target object)

Źródło: Opracowanie własne.

## 4. Podsumowanie

Znane w literaturze metody morfingu omówione w artykule: interpolacja kształtu, model Gaussa i macierz przekształceń, są przydatne do generowania płynnych animacji przejścia dla obiektów dwuwymiarowych, jednak każda z nich ma swoje ograniczenia niepozwalające na uniwersalne zastosowanie, umożliwiające wygenerowanie płynnych przejść dla dowolnej figury. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że znacznie lepsze wyniki w generowaniu płynnych animacji można uzyskać za pomocą algorytmu morfingu z zastosowaniem modelu Gaussa wzbogaconego o programowanie dynamiczne. Taka strategia morfingu umożliwia uzyskanie modeli o wysokiej jakości i naturalnym przekształceniu.

Wspólnym elementem wszystkich metod pozostaje interpolacja. W niektórych dotyczy ona samych figur, w innych ich modelowych opisów. Niemniej jednak nierozwiązanym zagadnieniem dla wszystkich metod jest wyznaczenie jednoznacznie uniwersalnej funkcji interpolującej, której zastosowanie umożliwiłoby dopasowanie się metod do przekształcanych obiektów bez potrzeby wstępnej definicji strategii generowania pośrednich stanów.

## Bibliografia

1. Remondino F.: From point cloud to surface: the modeling and visualization problem. Proc. Int. Worksh. Visualization and Animation of Reality-Based 3D Models, vol. XXXIV, No. 5, 2003.
2. Kobbelt L.P., Botsch M.: An Interactive Approach to Point Cloud Triangulation. Computer Graphics Forum, vol. 19, No. 3, 2000, p. 479-487.
3. MacDonald D., Kabani N., Avis D., Evans A.C.: Automated 3-D Extraction of Inner and Outer Surfaces of Cerebral Cortex from MRI. NeuroImage, vol. 12, No. 3, 2000, p. 340-356.
4. Clarke L.P., Velthuizen R.P., Camacho M.A., Heine J.J., Vaidyanathan M., Hall L.O., Thatcher R.W., Silbiger M.L.: MRI segmentation: Methods and applications. Magnetic Resonance Imaging, vol. 13, No. 3, 1995, p. 343-368.
5. Carmel E., Cohen-Or D.: Warp-guided Object Space Morphing. The Visual Computer, vol. 13, 1997.
6. Lee A., Dobkin D., Sweldens W., Schroder P.: Multiresolution Mesh Morphing. Proceedings of the SIGGRAPH '99, 1999.
7. Wolberg G.: Digital Image Morphing. IEEE Computer Society Press, 1990.
8. Marsden J., Hughes T.: Mathematical Foundations of Elasticity. Dover Publications, 1994.



9. Fortuna Z., Macukow B., Wasowski J.: *Metody numeryczne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
10. Kilian M., Mitra N.J., Pottmann H.: Geometric modeling in shape space. *ACM Trans. Graph*, vol. 26, No. 3, 2007, p. 64:1-64:8.
11. Lulf F.A., Tran D.M.: Reduced bases for nonlinear structural dynamic systems: A comparative study. *Journal of Sound and Vibration*, vd. 332, nr 15, 2013, p. 3897-3921.
12. Nashel A.: *Recognition I: Extended Gaussian Images*. Computer Vision.
13. Kang S., Ikeuchi K.: *3-D Object Pose Determination Using Complex EGI*, 1990.
14. Horn B.: *Robot Vision*. Cambridge, MIT Press, 1986, p. 365-399.
15. Hall R., Gumustekin S.: *Applications of Computer Vision*. Workshop on Computer Vision, 1996.
16. Kamvysselis M., *2D Polygon Morphing Using The Extended Gaussian Image 1997* [Online]. Available: <http://web.mit.edu/manoli/ecimorph/www/ecimorph.html>. [Data uzyskania dostępu: 02.05.2016].
17. Horn B.: „In Proceedings of the IEEE 72”, 1984.
18. Alexa M., Cohen-Or D., Levin D.: „SIGGRAPH '00 Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques”, *As-rigid-as-possible shape interpolation*, 2000.
19. Aronov B., Seidel R., Souvaine D.: On compatible triangulations of simple polygons. *Computational Geometry: Theory and Applications*, No. 3, 1993, p. 27-35.
20. Von Tycowicz C., Schulz C., Seidel H.-P., Hildebrandt K.: An efficient construction of reduced deformable objects. *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, No. 6, 2013, p. 213:1-213:10.
21. Alexa M.: *Merging Polyhedral Shapes with Scattered Features*. *The Visual Computer*, vol. 16, No. 1, 2000.

## Abstract

The problem of reconstruction of three-dimensional objects from the set of flat geometric figures is nowadays one of the most important areas of computer graphics. With the continuous development in a field of image manipulation techniques and rising computational power, the research of strategies of describing multidimensional structures is expanding. In the last few years many new techniques of physical objects digitalization have emerged. Common issue of all those methods is the correspondence of two adjacent layers. More the different are the figures that represent those layer harder it is to generate natural and realistic digital structure. This article outlines few of the most popular methods of 2D object morphing that allows to create smooth transformations between two supplied 2D shapes as the remedy for the correspondence of adjacent layers issue. It also suggests new enhancements that can be done to existing methods in order to extend their capabilities.