

# PRZEPROJEKTOWYWANIE MORFOLOGII MINIMALNIE SZTYWNYCH SZKIELETÓW SZACHOWNICOWYCH

Zenon Rychter

Politechnika Białostocka, Wydział Architektury, ul. O. Sosnowskiego 11, 15-893 Białystok  
E-mail: z.rychter@pb.edu.pl

## MORPHOLOGY REDESIGN OF MINIMALLY RIGID CHESSBOARD FRAMES

### Abstract

The paper deals with the morphology redesign of planar minimally rigid chessboard-like rectangular frames. Morphologies are patterns of rigid cells dispersed among non-rigid cells. A minimally rigid frame – minimal morphology - has the lowest possible number of rigid cells. Minimal morphologies offer economy by minimizing the number of structural elements and joints. Such morphologies can be very diverse visually, they form a rich design space. They can be easily manually designed with pen-and-paper by recursively expanding smaller rigid frames, as shown by this author in a previous paper. The present paper develops a simple manual pen-and-paper minimal-morphology redesign method based on moving around one-by-one rigid cells that are single in a layer of cells. The approach can be easily applied to practically reconfiguring physical objects with minimal morphologies – building frames, interior frames, and furniture. Several applications of the redesign method are shown, producing diverse morphologies – linear, branched, dispersed, regular, and chaotic, which can satisfy varied practical and esthetic requirements of architects, interior designers, and furniture designers.

### Streszczenie

Przedmiotem pracy jest przeprojektowywanie morfologii płaskich szkieletów o strukturze prostokątnej szachownicy i minimalnej sztywności. Morfologie to konfiguracje komórek sztywnych rozproszonych między komórkami nieszywnymi. Szkielet minimalnie sztywny – morfologia minimalna - ma najmniejszą dopuszczalną liczbę komórek sztywnych. Morfologie minimalne są oszczędne, zawierają minimum elementów i połączeń. Są one bardzo zróżnicowane wizualnie, tworząc bogatą przestrzeń projektową. Można je łatwo ręcznie zaprojektować na kartce papieru metodą wielokrotnego rozszerzania mniejszych szkieletów sztywnych, jak to pokazał autor w pracy wcześniejszej. Praca obecna przedstawia prostą manualną metodę przeprojektowywania morfologii minimalnych, polegającą na przesuwaniu jedna po drugiej komórek sztywnych, które są singlami w warstwach komórek. Metoda ta może być łatwo zastosowana do praktycznej rekonfiguracji obiektów fizycznych o morfologii minimalnej – budynków, obiektów wnętrzarskich i mebli. Pokazano szereg zastosowań metody do zaprojektowania różnorodnych morfologii minimalnych – liniowych, rozgałęzionych, rozproszonych, regularnych i chaotycznych, które mogą spełnić rozmaite praktyczne i estetyczne wymagania architektów, projektantów wnętrz i projektantów mebli.

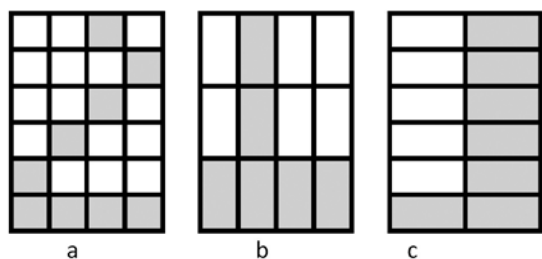
Keywords: architectural design; interior design; furniture design; redesign; structural morphology; minimally rigid frames

Słowa kluczowe: projektowanie architektoniczne; projektowanie wnętrz; projektowanie mebli; przeprojektowywanie; morfologia konstrukcji; szkielety minimalnie sztywne

## WPROWADZENIE

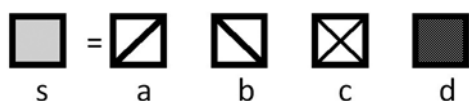
Przedmiotem pracy jest przeprojektowywanie morfologii prostokątnych lub kwadratowych szkieletów szachownicowych, złożonych z prostokątnych lub

kwadratowych komórek, tworzących warstwy poziome i pionowe (Ryc.1).



**Ryc. 1.** Prostokątne szkielety szachownicowe o różnych morfologiach minimalnych. Rys. pokazuje płaski układ prętowy lub przekrój pionowy przestrzennego układu płytowego. Komórki białe są puste i nieszttywne. Komórki szare są sztywne. Morfologia to konfiguracja komórek szarych – sztywnych: (a) komórki kwadratowe; (b, c) komórki prostokątne; rys. autor

Szkielet może być układem prętów – ramą lub kratownicą. Może to być konstrukcja płytowa; w takim przypadku ryc. 1 pokazuje przekrój pionowy konstrukcji. Komórki szkieletu są dwóch rodzajów. Komórki białe są puste i nieszttywne, łatwo deformują się w równoległoboki. Komórki szare są sztywne, trudno deformowalne. Ryc. 2 pokazuje różne praktyczne realizacje komórek sztywnych, uzyskujących sztywność dzięki prętom ukośnym (krzyżulcom), parom skrzyżowanych, napiętych cięgien lub dzięki tarczy zamurującej komórkę.



**Ryc. 2.** Konstrukcja komórek sztywnych - szarych (s). Komórka z prętowym krzyżulcem sztywnym na ściskanie i rozciąganie (a, b). Komórka z parą napiętych lin lub cienkich prętów sztywnych tylko na rozciąganie (c). Tarcza - płyta wypełniająca komórkę sztywnym materiałem (d). Komórki sztywne w szkielecie mogą być wszystkie jednego typu lub być dowolną kompozycją par, trójek, lub czwórek ze zbioru {a,b,c,d}; rys. autor

Morfologia szkieletu to konfiguracja komórek szarych - sztywnych, wymieszanych w ramach prostokątnego obrysu z komórkami białymi - nieszttywnymi. Interesujące w tej pracy są morfologie minimalne – szkielety z minimalną liczbą komórek szarych, gwarantującą sztywność całości. Rozpatrywane są szkielety swobodne, niepodparte, które zawdzięczają sztywność własnej konfiguracji - morfologii, a nie

sztywności otoczenia. Trzy takie szkielety o zróżnicowanych morfologiach pokazuje ryc. 1. Morfologia (a) jest mozaikowa, rozproszona, chaotyczna. Morfologie (b, c) są regularne, liniowe, złożone z pionowej szarej belki stojącej na belce poziomej. Szkielet o ustalonej liczbie warstw poziomych i pionowych ma wiele morfologii minimalnych. Fakt ten czyni zagadnienie morfologii minimalnych interesującym praktycznie i teoretycznie.

Sposób patrzenia na badane konstrukcje szkieletowe jak na mozaiki komórek sztywnych i nieszttywnych zaproponował autor tej pracy, badając szkielety dwuwarstwowe<sup>1</sup>. W pracy<sup>2</sup> tenże autor wprowadził pojęcie morfologii szkieletów i rozwinął prostą metodę konstrukcji sztywnych szkieletów o morfologii minimalnej z dowolną liczbą warstw poziomych i pionowych. Metoda polega na stopniowej, wielokrokowej rozbudowie sztywnego prostokąta o jedną warstwę. Procedura ta uogólnia i upraszcza klasyczną metodę Henneberga<sup>3,4</sup> rozbudowy kratownic, polegającą na wielokrotnym przyłączaniu do kratownicy nowego węzła za pomocą dwóch nowych, nierównoległych prętów. Uproszczenie proponowane przez autora polega na patrzeniu na szkielet jak na układ komórek sztywnych i nieszttywnych, a nie prętów i węzłów (kratownica) – komórek jest znacznie mniej niż prętów i węzłów. Uogólnienie wynika z faktu, że sztywne komórki mogą mieć dowolną budowę wewnętrzną (ryc. 2), będąc prętowym krzyżulcem (dwa możliwe kierunki), skrzyżowaniem dwóch napiętych lin, tarczą zamurującą komórkę. Nadto w jednym szkielecie może wystąpić dowolna kombinacja sztywnych komórek o różnej budowie. Nowoczesna ogólna matematyczna teoria kratownic minimalnie sztywnych traktuje kratownice jako grafy Lamana<sup>5,6</sup>. Ponieważ grafy to pręty łączące węzły, podejście to nie ma prostoty ujęcia komórkowego, proponowanego przez autora.

Przedmiotem tej pracy są zmiany morfologii szachownicowych, problem rekonfiguracji, przeprojektowywania. Rekonfiguracja jest szczególnie istotna w projektowaniu koncepcyjnym, wstępnym, kiedy częste zmiany koncepcji przestrzennej są naturalne. Zmiana konfiguracji, przebudowa jest też istotna w odniesieniu do istniejących fizycznie obiektów architektury, budowli inżynierskich, obiektów wnętrza i mebli.

<sup>1</sup> Z. Rychter, A. Musiuk, *Topological sensitivity to diagonal member flips of two-layered statically determinate trusses under worst loading*, „Int. J. Solids and Structures” nr 44, 2007, s. 4942-4957.

<sup>2</sup> Z. Rychter, *Projektowanie morfologii minimalnie sztywnych szkieletów szachownicowych*, „Architecturae et Artibus” nr 2, 2013, s. 25-32.

<sup>3</sup> L. Henneberg, *Die graphische Statik der starren Systeme* Leipzig, 1911.

<sup>4</sup> *Laman graph*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Laman\\_graph](http://en.wikipedia.org/wiki/Laman_graph) [dostęp:14-06-2014].

<sup>5</sup> *Ibidem*.

<sup>6</sup> G. Laman, *On graphs and rigidity of plane skeletal structures*, „J. Engrg. Math.” nr 4, 1970, s. 331-340.

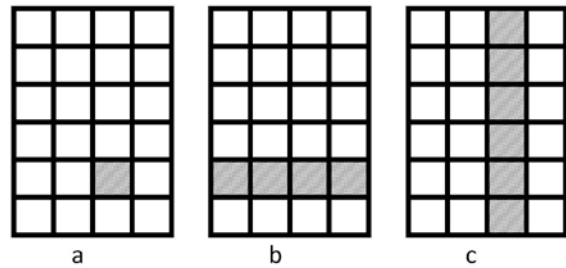
Niniejsza praca przedstawia bardzo prostą procedurę rekonfiguracji morfologii minimalnie sztywnych. Metoda polega na przesuwaniu komórek sztywnych w tych warstwach, w których jest tylko jedna komórka sztywna (singiel). Procedura ta jest bardzo prosta, logiczna, czysto jakościowa, wizualna, możliwa do ręcznej realizacji na kartce papieru. Umożliwia ona lokalne, pośrednie i globalne zmiany morfologii, ruchy pojedynczych komórek i grup komórek, ruchy małe i duże, regularne i chaotyczne, jednokierunkowe i dwukierunkowe. Powtarzając ruchy singli, można przekształcić dowolną morfologię minimalną w dowolną inną. Przekształcanie szkielet zachowuje sztywność – projektant jest więc pewien, że cały czas pozostaje w przestrzeni prawidłowych konstrukcji, sztywnych ustrojów, które da się zbudować, a nie artefaktów. Proponowana metoda jest czysto jakościowa, realizując ważny postulat Wacława Zalewskiego<sup>7</sup>, by na potrzeby projektowania koncepcyjnego rozwijać metody jakościowe.

W następnej części pracy metodą rozbudowy sztywnego prostokąta skonstruowano najprostszą morfologię – punkt wyjścia do przekształceń morfologicznych. W dalszej części wprowadzono pojęcia singla, warstwy singlowej, ruchu singla – podstawy metody zmiany morfologii przez przesuwanie singli w warstwach singlowych. Podano liczne zastosowania ruchów jednokierunkowych, a następnie dwukierunkowych do przekształcenia prostej morfologii startowej w różnorodne wizualnie morfologie potomne: liniowe i mozaikowe, skupione i rozproszone, regularne i chaotyczne.

Proponowana procedura rekonfiguracji z uwagi na prostotę połączoną z dużymi możliwościami jest adresowana do architektów, architektów wnętrz i projektantów mebli zainteresowanych projektowaniem koncepcyjnym.

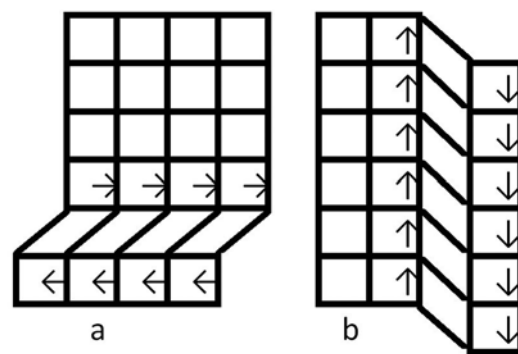
## 1. MORFOLOGIA STARTOWA - KONSTRUKCJA METODĄ ROZBUDOWY SZTYWNEGO PROSTOKĄTA

Uruchomienie procesu rekonfiguracji musi być poprzedzone konstrukcją minimalnej morfologii początkowej. Konstrukcję taką można łatwo wykonać opracowaną przez autora metodą rozbudowy sztywnego prostokąta<sup>8</sup>. Podstawą tej metody jest potraktowanie szkieletu jak układu warstw poziomych (wierszy) i pionowych (kolumn), zbudowanych z identycznych prostokątnych komórek (ryc. 3).



Ryc. 3. Elementy pustego - nieszywnego szkieletu: (a) komórka; (b) warstwa pozioma; (c) warstwa pionowa; rys. autor

Prostokątna, pusta komórka z cieniem obramowaniem prętowym lub płytowym jest fundamentalnie, geometrycznie nieszywna; łatwo – w porównaniu z komórką pełną - zmienia kształt z prostokąta na równoległobok. W szkielecie warstwowym deformacja jednej komórki wymusza (ryc. 4) identyczną deformację pozostałych komórek w pustej warstwie, poziomej lub pionowej.

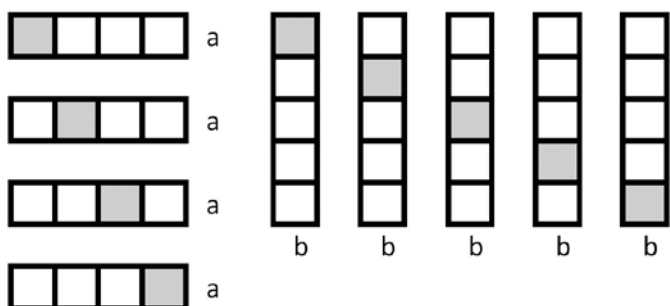


Ryc. 4. Deformacja pustej, nieszywniej warstwy szkieletu: (a) poślizg poziomy warstwy poziomej; (b) poślizg pionowy warstwy pionowej. Deformacja dowolnej jednej komórki w warstwie wymusza identyczną deformację pozostałych komórek w warstwie; rys. autor

Deformacja warstwy poziomej powoduje poziomy poślizg części szkieletu powyższej warstwy względem części poniżej warstwy. Analogicznie, deformacja warstwy pionowej powoduje pionowy poślizg części szkieletu na prawo od warstwy względem części na lewo od warstwy. Synchroniczna, sprzężona podłużna deformacja wszystkich komórek w warstwie, gdy deformuje się dowolna jedna komórka, oznacza, że usztywnienie dowolnej jednej komórki likwiduje podłużną deformację całej warstwy (ryc. 5) poziomej lub pionowej.

<sup>7</sup> A. Allen, W. Zalewski, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ, 2010, s. 622.

<sup>8</sup> Z. Rychter, *Projektowanie...*, op. cit., s. 25-32.



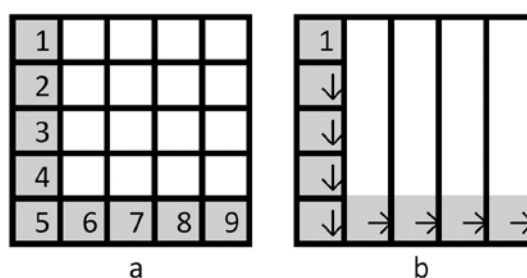
**Ryc. 5.** Możliwe położenia jednej komórki sztywnej - szarej (singla) usztywniającej całą warstwę na poślizg poziomy (a), pionowy (b). Singiel (a) można traktować jako ruchomy poziomo; singiel (b) jako ruchomy pionowo: (a) warstwy singlowe poziome; (b) warstwy singlowe pionowe; rys. autor

Warstwę z jedną komórką sztywną nazywać będziemy warstwą singlową, poziomą lub pionową, a samą komórkę nazwiemy singlem, poziomym lub pionowym. Warstwa singlowa jest sztywna wzdłuż siebie. W kierunku poprzecznym warstwa singlowa nie jest sztywna. Podłużne przyklejenie warstwy singlowej na całej długości do dowolnego układu sztywnego we wszystkich kierunkach - np. do sztywnego prostokąta - usuwa poprzeczną niesztywność warstwy singlowej. Zatem sztywny prostokąt z doklejoną warstwą singlową jest większym sztywnym prostokątem. Operację doklejania warstwy singlowej do dowolnego boku sztywnego prostokąta można powtarzać dowolną liczbę razy. Startując z pojedynczej komórki sztywnej, można w ten sposób skonstruować dowolnie duży szkielet minimalnie sztywny. Szkielet taki jest w istocie prostokątną mozaiką sklejoną z coraz dłuższych warstw singlowych. Wybierając różne sekwencje doklejania warstw singlowych (każdy prostokąt ma cztery boki) i różne położenia singli w warstwach singlowych, otrzymujemy szkielety o rozmaitych morfologiach minimalnych. Liczne przykłady takich morfologii zawarto w pracy<sup>9</sup>.

W niniejszej pracy wykorzystamy jako punkt startowy procedury rekonfiguracji morfologię najprostszą, przypominającą literę L. Ryc. 6 przedstawia konstrukcję tej morfologii metodą rozbudowy sztywnego prostokąta w przypadku szkieletu rozmiaru 5x5 (liczba warstw poziomych x liczba warstw pionowych).

Morfologię L skonstruowano w dziewięciu krokach, zastępując w każdym kroku jedną komórkę pustą - niesztywną jedną komórką sztywną. Pierwszą komórkę sztywną umieszczono w lewym górnym narożu. Kolejne cztery komórki dodano, poruszając się do

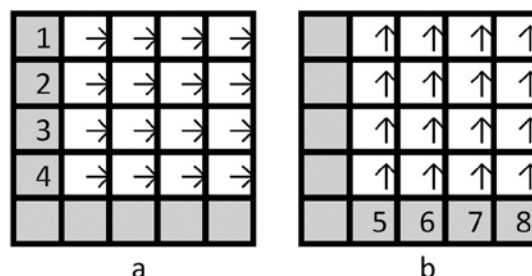
dołu. Kolejne cztery komórki dodano, poruszając się w prawo. W krokach 1,2,3,4,5 sztywny prostokąt ma szerokość jednej komórki i powiększa się pionowo do dołu. W krokach 6,7,8,9 sztywny prostokąt ma wysokość pięciu komórek i poszerza się poziomo w prawo o jedną pionową warstwę singlową. Opisana sekwencja ruchów, trasa strzałek na ryc. 6b, jest możliwie najprostsza - skręca tylko raz. Wynikiem jest najprostsza możliwa morfologia, kształt L. Komórki sztywne wypełniają tu jedną (lewą) kolumnę i jeden (dolny) wiersz. Jest to prosta, ogólna reguła konstrukcyjna, ważna dla szkieletu o dowolnej liczbie wierszy i kolumn. Z tego powodu morfologia L stanowi idealną morfologię startową w procesie przeprojektowywania.



**Ryc. 6.** Konstrukcja sztywnego szkieletu o morfologii minimalnej i najprostszej formie L. Metoda - rozbudowa sztywnego prostokąta: (a) komórki sztywne dodawane w kolejności 1,2,...,9; (b) rosnący sztywny prostokąt: w krokach 2,3,4,5 prostokąt rośnie w dół o jedną komórkę sztywną; w krokach 6,7,8,9 rośnie w prawo o jedną warstwę singlową pionową; rys. autor

## 2. PRZEPROJEKTOWYWANIE METODĄ RUCHU SINGLI

Morfologia L jest nie tylko najprostsza z możliwych, ale oferuje też największe możliwości rekonfiguracji. W szkielecie L wszystkie warstwy poziome, z wyjątkiem jednej - dolnej, i wszystkie warstwy pionowe, z wyjątkiem jednej - lewej - są warstwami singlowymi (ryc. 7). W szkielecie tym wszystkie komórki sztywne, oprócz jednej - narożnej, są singlami.

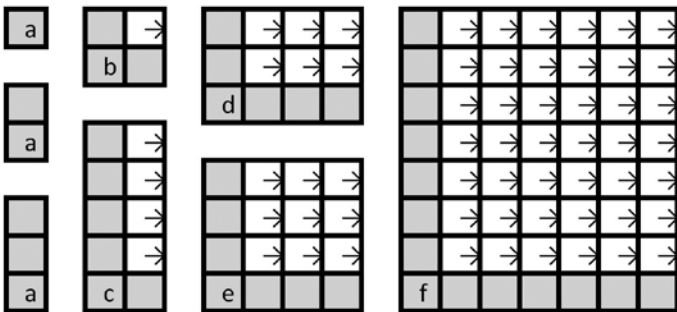


**Ryc. 7.** Single, warstwy singlowe, możliwe ruchy singli szkieletu 5x5 o morfologii L: (a) poziome - 1,2,3,4; (b) pionowe - 5,6,7,8. Strzałki pokazują kierunki i komórki docelowe ruchów singli; rys. autor

<sup>9</sup> Ibidem

Jak pokazano wcześniej (ryc. 5), single można traktować jako ruchome, bez naruszenia sztywności szkieletu. Single poziome można dowolnie przesuwać w ich warstwach poziomych. Single pionowe można przemieszczać swobodnie w ich warstwach pionowych. Na ryc. 7 single poziome to komórki 1,2,3,4, a single pionowe to komórki 5,6,7,8. Każdy z czterech singli poziomych może przesunąć się w prawo o 0 (brak przesunięcia), 1,2,3,4 komórki. Ruchy tych singli są równoległe do siebie, bezkolizyjne, tworzą przepływy. Mnożąc liczbą singli poziomych przez liczbę ich możliwych położeń, otrzymujemy  $4 \times 5 = 20$  różnych morfologii generowanych przez formę L za pomocą przepływów poziomych; jest wśród nich L. Kolejne 20 morfologii można otrzymać, wykonując różne przepływy pionowe; jest wśród nich L. W sumie forma L oraz formy od niej pochodne, tj. 19 nowych form wynikających z przepływów poziomych oraz 19 nowych form wynikających z przepływów pionowych, tworzą 39 różnych morfologii minimalnie sztywnych szkieletów rozmiaru  $5 \times 5$ . Dodatkowe morfologie powstają przy mieszaniu ruchów poziomych i pionowych.

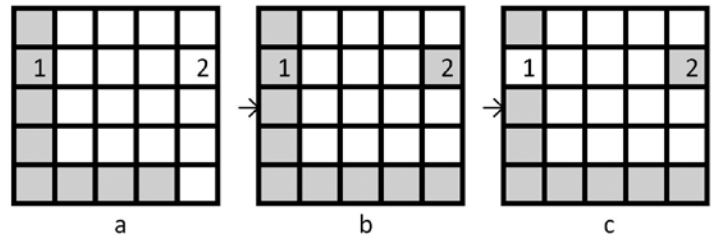
Liczba morfologii generowanych z formy L różnie wraz ze wzrostem rozmiaru szkieletu (ryc. 8).



**Ryc. 8.** Wzrost liczby morfologii generowanych z formy L ruchami poziomymi singli wraz ze wzrostem rozmiaru szkieletu.  
 $N = \text{liczba morfologii} = (\text{liczba singli}) \times (\text{liczba położeń singla})$ ;  
 (a)  $N=0$ ; (b)  $N=1 \times 2=2$ ; (c)  $N=4 \times 2=8$ ; (d)  $N=2 \times 4=8$ ; (e)  $N=3 \times 4=12$ ;  
 (f)  $N=7 \times 7=49$ ; rys. autor

Szkielet rozmiaru  $8 \times 7$  na ryc. 8f pozwala na wygenerowanie samymi ruchami poziomymi  $7 \times 7 = 49$  morfologii, wliczając morfologię startową L. Ruchy pionowe dają  $6 \times 8 = 48$  morfologii, wliczając L. Do tego dochodzą morfologie wynikające z ruchów mieszanych, poziomych i pionowych. Możliwości rekonfiguracji metodą ruchu singli są więc bardzo bogate, a zatem interesujące dla projektantów. Rekonfiguracja jest przy tym działaniem elementarnym, łatwym do ręcznego wykonania na kartce papieru.

Przesunięcie singla jest łatwe do bezpiecznego wykonania w realnym obiekcie wymagającym przebudowy (ryc. 9).

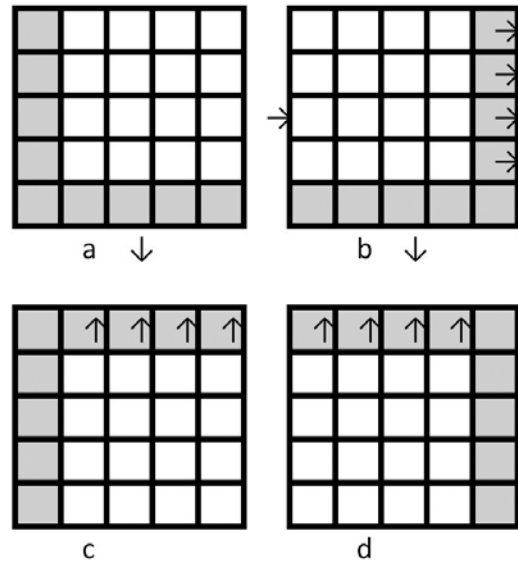


**Ryc. 9.** Fizyczna, bezpieczna realizacja ruchu singla 1 do komórki 2 w dwóch krokach; (a) szkielet wyjściowy - komórka 1 sztywna, komórka 2 niesztwna; (b) szkielet pośredni - komórka 1 sztywna, komórka 2 sztywna; (c) szkielet docelowy - komórka 1 niesztwna, komórka 2 sztywna. Wszystkie szkielety (a,b,c) są sztywne; ryc. autor

Chcąc przenieść usztywnienie z komórki 1 do komórki 2 w tej samej warstwie singlowej, usztywniamy komórkę 2, po czym usuwamy usztywnienie komórki 1. Na każdym etapie szkielet jest sztywny, a więc bezpieczny. Operację tego rodzaju można stosować wielokrotnie do różnych komórek singlowych, realizując bezpiecznie dowolnie złożoną rekonfigurację szkieletu fizycznego.

### 2.1. Ruchy jednokierunkowe

Najprostsze przekształcenia morfologii to przepływy – ruchy jednokierunkowe. Ryc. 10 przedstawia przepływy zmieniające kształt L w jego odbicia zwierciadlane.

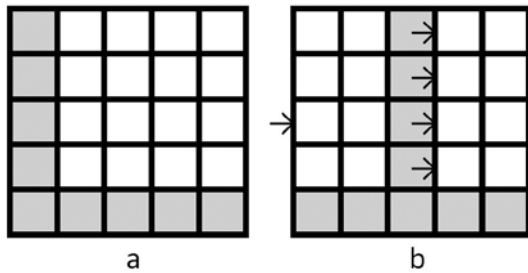


**Ryc. 10.** Jednokierunkowe ruchy singli (przepływy) zmieniające formę L (a) w jej odbicia zwierciadlane (b,c,d). Strzałki pokazują komórki docelowe i kierunek przepływu; rys. autor

Odbicia zwierciadlane L są równoważne L: są tak samo proste, mają tyle samo singli, są utworzone przez dwie sztywne skrzyżowane belki krawędziowe. Przepływ jako ruch jednokierunkowy komórek poru-

szających się równolegle - jest bezkolizyjny. Wszystkie komórki można przemieścić jednocześnie lub w dowolnych podzbiorach, w dowolnej kolejności. Formę (a) przekształca w formę (b) jeden przepływ poziomy całościowy, wszystkich singli. Formę (a) przekształca w formę (c) jeden całościowy przepływ pionowy. Forma (d) powstaje z formy (a) po wykonaniu kolejno dwóch przepływów: poziomego a->b oraz pionowego b->d.

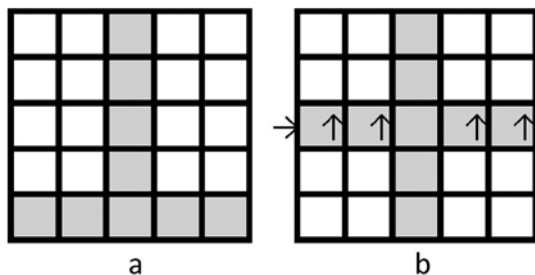
Ryc. 11 pokazuje całościowy przepływ poziomy przekształcający formę L w formę odwróconego T.



Ryc. 11. Przepływ poziomy zmieniający formę L (a) w formę odwróconego T (b). Strzałki pokazują komórki docelowe i kierunek ruchu; rys. autor

Forma T jest bardziej scentralizowana od L. Forma T jest bardziej sfragmentowana od L: T ma trzy gałęzie, L tylko dwie. Forma T składa się, jak L, z dwóch skrzyżowanych belek. T ma te same single, co L, cztery poziome i cztery pionowe. Z tego względu możliwości dalszego przekształcania T i L są identyczne.

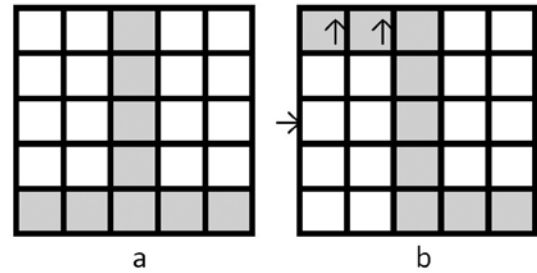
Ryc. 12 prezentuje całościowy przepływ pionowy przekształcający formę odwróconego T w kształt krzyża X, o ramionach poziomych i pionowych.



Ryc. 12. Przepływ pionowy zmieniający formę (a) odwróconego T w formę (b) krzyża X; rys. autor

Forma X jest bardziej scentralizowana od T. Forma X ma cztery gałęzie, jest bardziej sfragmentowana od formy T, która ma trzy gałęzie. Forma X składa się jak T i L z dwóch skrzyżowanych belek. X ma te same single, co T i L, te same możliwości dalszego przekształcania.

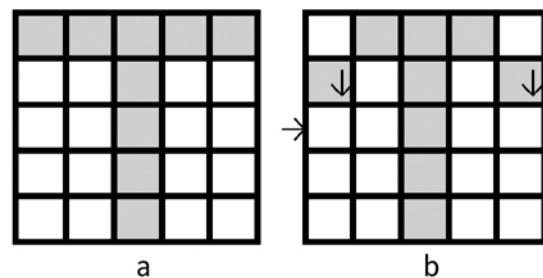
Ryc. 13 przedstawia cząstkowy, obejmujący połowę singli, przepływ pionowy przekształcający formę odwróconego T w formę Z, z pionowym środkiem.



Ryc. 13. Przepływ pionowy cząstkowy zmieniający formę (a) odwróconego T w formę Z - (b); rys. autor

Forma Z ma tylko jedną pełną belkę – pionową. Pełna belka pozioma z formy T została w formie Z podzielona na dwie części. Z utraciło jeden singiel poziomy obecny w T, ma więc mniejsze możliwości przekształcania.

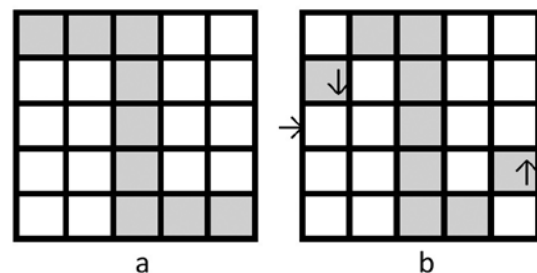
Ryc. 14 pokazuje cząstkowy, obejmujący połowę singli, przepływ pionowy przekształcający formę T w formę szeryfowego T.



Ryc. 14. Przepływ pionowy cząstkowy zmieniający formę T (a) w formę T szeryfowego (b); rys. autor

Forma (b) ma tylko jedną pełną belkę – pionową. Belka pozioma z formy (a) została sfragmentowana, skrócona na obu końcach. Dwa single pionowe trzymają się końców belki poziomej narożnikami, tworząc połączenie łańcuchowe. Forma (b) utraciła jeden singiel poziomy z formy (a), co zmniejsza możliwości dalszego przekształcania.

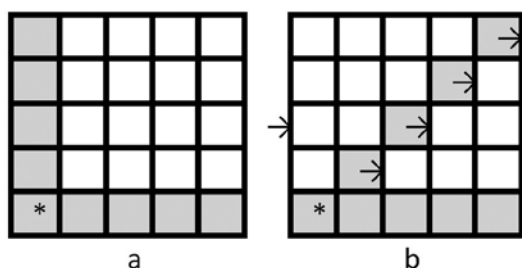
Ryc. 15 prezentuje cząstkowy, przeciwbieżny przepływ pionowy przekształcający formę Z w formę szeryfowego Z.



Ryc. 15. Przepływ pionowy przeciwbieżny cząstkowy zmieniający formę Z - (a) w formę Z szeryfową - (b); rys. autor

Forma (b) ma tylko jedną pełną belkę – pionową. Belki połówkowe poziome z formy (a) zostały sfragmentowane - skrócone na końcach. Dwa single pionowe trzymają się końców belek poziomych narożnikami, połączeniami łańcuchowymi. Forma (b) utraciła dwa single poziome z formy (a).

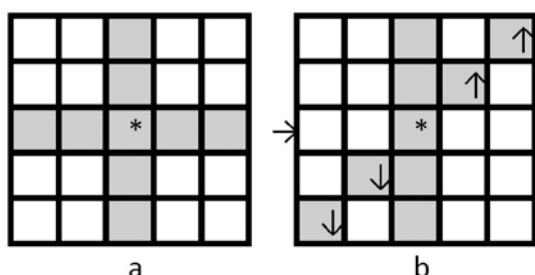
Ryc. 16 przedstawia całościowy przepływ poziomy, o prędkości wrastającej liniowo do góry, przekształcający formę L w formę L ukośnego.



**Ryc. 16.** Przepływ poziomy o liniowo zmiennej prędkości, rosnącej do góry, zmieniający formę L - (a) w formę L pochyłego - (b); rys. autor

Forma (b) ma tylko jedną pełną belkę – poziomą. Belka pionowa z formy (a) została przekształcona w ukośny łańcuch komórek połączonych narożnikami. Łańcuch ten zablokował (b) cztery komórki singlowe pionowe obecne w formie (a). Ruch poziomy przekształcił komórkę narożną (\*), która w formie (a) nie jest singlem, w singiel pionowy w formie (b). Formy (a) i (b) mają tyle samo singli poziomych. Singli pionowych jest o trzy mniej w (b) niż w (a), co czyni formę (b) bardziej zablokowaną, o mniejszej możliwości dalszego przekształcania.

Ryc. 17 pokazuje przepływ pionowy przeciwbieżny o liniowo zmiennej prędkości, rosnącej w lewo i prawo, przekształcający formę X w formę greckiej litery *chi*.

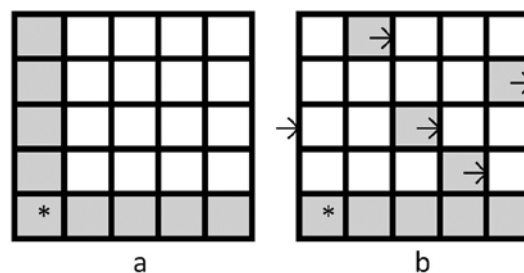


**Ryc. 17.** Przepływ pionowy przeciwbieżny o liniowo zmiennej prędkości, rosnącej w lewo i prawo, zmieniający formę X - (a) w formę *chi* - (b); rys. autor

Forma (b) ma tylko jedną pełną belkę – pionową. Belka pozioma z formy (a) została zamieniona na ukośny łańcuch komórek połączonych narożnikami.

Łańcuch ten zablokował w (b) cztery single poziome z formy (a), czyniąc formę (b) mniej przekształcalną od (a). Komórka (\*) nie była singlem w formie (a), ale stała się nim w formie (b).

Ryc. 18 pokazuje przepływ poziomy całościowy o chaotycznie zmiennej prędkości, przekształcający formę L w formę jednokierunkowo chaotyczną.



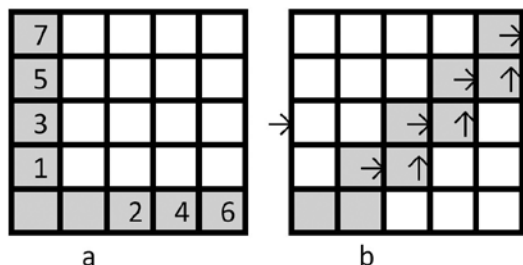
**Ryc. 18.** Przepływ poziomy o chaotycznie zmiennej prędkości zmieniający formę L - (a) w formę jednokierunkowo chaotyczną (b); rys. autor

Chaotyczne położenia singli poziomych ustalono, losując dla każdego z nich liczbę ze zbioru {1,2,3,4,5} – np. wyciągając z urny kartki z numerami {1,2,3,4,5} – i przesuwając singla do kolumny o wylosowanym numerze. Singiel pierwszy od góry ma wylosowaną kolumnę 2, drugi od góry kolumnę 5, trzeci kolumnę 3, a czwarty kolumnę 4. Forma (b) ma tylko jedną pełną belkę – poziomą. Belka pionowa z formy (a) została zamieniona w chaotyczną mozaikę. Forma (b) ma tyle samo singli poziomych, co (a), ale tylko jeden singiel pionowy (\*). W formie (a) komórka (\*) nie była singlem. Metodą losową można wygenerować wszystkie formy związane ze sobą przepływem poziomym. Jest ich 20, jak ustalono powyżej (ryc. 7). Wygenerowanie wszystkich 20 form wymaga wykonania odpowiednio wielu losowań. Niektóre z tych form będą regularne, np. L, odbicie zwierciadlane L, odwrócone T, L pochylone. Form regularnych jest relatywnie mało, dlatego trafienie na nie w pojedynczym losowaniu jest mało prawdopodobne, zwłaszcza w szkieletach wielowarstwowych. Zwykle losowanie ruchów daje morfologię chaotyczną, mozaikową, a nie regularną, liniową, typu L.

## 2.2. Ruchy dwukierunkowe

Ruchy dwukierunkowe, mieszające ruchy poziome i pionowe, poszerzają zbiór morfologii, które są wynikiem ruchów tylko jednokierunkowych. Ruchy dwukierunkowe na ogół muszą być wykonywane w odpowiedniej kolejności, gdyż przesunięcie singla poziomego do innej kolumny blokuje możliwość ruchu pionowego w tej kolumnie; podobnie ruchy singli pionowych blokują ruchy poziome.

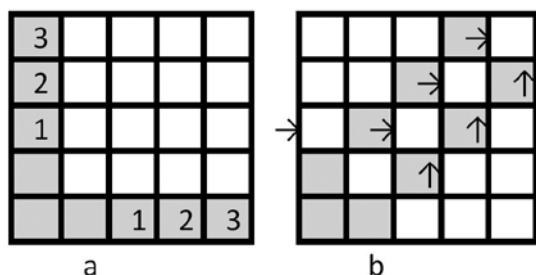
Ryc. 19 przedstawia sekwencję siedmiu naprzemiennych ruchów, czterech poziomych i trzech pionowych, przekształcającą formę L w ukośną belkę schodkową.



**Ryc. 19.** Sekwencja siedmiu naprzemiennych ruchów poziomych/pionowych singli 1,2,3,4,5,6,7 zmieniająca formę L - (a) w formę belki schodkowej (b); rys. autor

Ruchy poziome blokują tu ruchy pionowe i wzajemnie, muszą więc być wykonywane w odpowiedniej kolejności. Formę L tworzą dwie belki, pozioma i pionowa (a). Belka schodkowa, ukośna jest jedna (b). Forma L ma osiem singli. Belka schodkowa ma tylko dwa single – komórki końcowe. Belka schodkowa jest więc bardzo zablokowana w porównaniu do formy L, oferuje niewielkie możliwości dalszej transformacji.

Ryc. 20 pokazuje sekwencję trzech par ruchów, poziomego i pionowego w każdej parze, przekształcającą formę L w ukośną szachownicę.



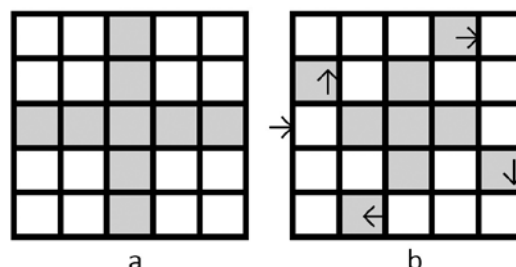
**Ryc. 20.** Sekwencja trzech par ruchów poziomy+pionowy singli 1,2,3 zmieniająca formę L - (a) w formę ukośnej szachownicy schodkowej (b); rys. autor

Para ruchów (3) blokuje parę (2), która blokuje parę (1) – kolejność ruchów nie jest zatem dowolna. Forma (a) jest liniowa. Forma (b) jest mozaikowa. Ukośną szachownicę (b) można traktować jak rozrzedzoną ukośną belkę schodkową z ryc. 19b. Forma (a) ma osiem singli. Forma (b) ma tylko dwa single – w prawym górnym narożu.

Ryc. 21 przedstawia wir czterech komórek singlowych, zgodny z ruchem wskazówek zegara, przekształcający formę X w formę swastyki.

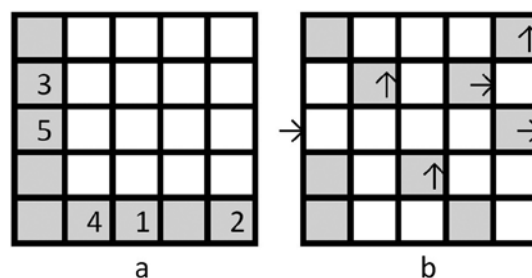
Ruchy czterech singli są tu niezależne od siebie, nie blokują się, mogą być więc wykonane jednocześnie

lub w dowolnej sekwencji. Forma (a) jest liniowa. Forma (b) jest mozaikowa. Forma (a) ma osiem singli. Forma (b) ma tylko cztery single – na obwodzie. Przekształcenie wirowe można wykonać na szkielecie X dowolnego rozmiaru, o jednakowej liczbie warstw poziomych i pionowych.



**Ryc. 21.** Wir zgodny z ruchem wskazówek zegara zmieniający formę krzyża X - (a) w formę swastyki (b); rys. autor

Ryc. 22 pokazuje sekwencję pięciu chaotycznych ruchów poziomych i pionowych, która przekształca L w mozaikę w pełni, dwukierunkowo chaotyczną.



**Ryc. 22.** Chaotyczna sekwencja pięciu ruchów poziomych i pionowych singli 1,2,3,4,5 zmieniająca formę L - (a) w formę chaotyczną w dwóch kierunkach (b); rys. autor

Ruchy wykonywano losując komórkę singlową i długość jej przesunięcia – liczby 0,1,2,3,4,5; 0 oznacza brak przesunięcia. W pierwszym kroku porusza się jeden z ośmiu singli, w drugim jeden z sześciu, w trzecim jeden z czterech itd. Liczba singli możliwych do przesunięcia zmniejsza się o dwa w każdym kroku, gdyż singiel poruszony nie jest dalej losowany, a jego ruch blokuje i eliminuje jakiś singiel poprzeczny do poruszonego. Forma (a) jest liniowa, składa się z dwóch dużych belek. Forma (b) jest mozaikowa, chaotyczna, rozproszona; praktycznie nie ma belek – najdłuższa belka, w lewym dolnym narożu, ma tylko dwie połączone bokami komórki. Forma (a) ma osiem singli. Forma (b) ma tylko trzy single – położone w drugiej i trzeciej kolumnie i środkowym wierszu.



## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono bardzo prostą ręczną metodę wizualnego przeprojektowywania morfologii prostokątnych szkieletów szachownicowych o minimalnej morfologii zapewniającej sztywność. Metoda polega na przesuwaniu sztywnych komórek, które są singlami w swoich warstwach komórek. Komórki singlowe są łatwe do dostrzeżenia w projekcie. Można je przesuwac pojedynczo lub grupami, regularnie lub losowo. Operacje te generują bogactwo różnorodnych morfologii – liniowych, rozproszonych, regularnych, chaotycznych, umożliwiających spełnienie rozmaitych wymagań praktycznych i estetycznych. Metoda przesuwania pojedynczych komórek jest łatwa do praktycznej realizacji w obiektach fizycznych. To metoda uniwersalna. Liczba warstw poziomych i pionowych szkieletu jest dowolna. Materiał szkieletu nie jest istotny. Skala obiektu jest dowolna. Rozważane szkielety mogą być prętowe lub płytowe, reprezentować ustroje architektoniczne, architektury wnętrz lub meble, szkielety reklamowe i wystawiennicze, rozmaite obiekty prefabrykowane i tymczasowe. Praca jest adresowana do projektantów z tych dziedzin.

## LITERATURA

1. **Allen A., Zalewski W. (2010)**, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ.
2. **Henneberg, L. (1911)**, *Die graphische Statik der starren Systeme*, Leipzig.
3. **Laman G. (1970)**, *On graphs and rigidity of plane skeletal structures*, "J. Engrg. Math." nr 4.
4. **Rychter Z. (2013)**, *Projektowanie morfologii minimalnie sztywnych szkieletów szachownicowych*, „Architecturae et Artibus” nr 2.
5. **Rychter Z., Musiuk A. (2007)**, *Topological sensitivity to diagonal member flips of two-layered statically determinate trusses under worst loading*, "Int. J. Solids and Structures" nr 44.

## ŹRÓDŁA INTERNETOWE

1. *Laman graph*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Laman\\_graph](http://en.wikipedia.org/wiki/Laman_graph) [dostęp:14-06-2014].

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego S/WA/1/11 Politechniki Białostockiej. Autor wyraża podziękowanie anonimowej osobie recenzującej za wnikliwe uwagi poszerzające zakres zastosowań rozważanych konstrukcji, doskonalące styl pracy oraz za wskazanie błędu w liczbie singli jednego szkieletu.