

Naturalne procesy formotwórcze, matematyka i architektura

Natural form-shaping processes, mathematics and architecture

Krystyna Januszkiewicz
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: procesy naturalne, matematyka, architektura,
Keywords: natural form-shaping processes, mathematics, architecture

Streszczenie

Wzory, których dostarcza Natura były od zarania dziejów inspirujące dla form budowlanych. Formy te stanowiły rodzaj pomostu pomiędzy człowiekiem a właściwym mu środowiskiem przyrodniczym. Dziś uczymy się od Natury oszczędnego gospodarowania energią i materiałem, odnajdujemy w jej utworach efektywne rozwiązania inżynierskie i wzory struktur dla nowych materiałów budowlanych. A także poznajemy sposoby, w jaki środowiska naturalne i zbudowane mogłyby ze sobą najlepiej współdziałać. Aby projektować tak jak czyni to Natura w swoim środowisku, to istotne jest zrozumienie na czym polega emergencja, naturalne procesy formotwórcze oraz wiedzieć jak wykorzystywać matematykę do opisu tych procesów w sposób przydatny projektantom. Oznacza to, że należy poznać zasady i dynamikę organizacji i interakcji systemów naturalnych oraz prawa matematyczne, które opisują te systemy i mogą być zastosowane do konstruowania podobnych systemów sztucznych.

W artykule opisuje się w jaki sposób matematyka dostarcza narzędzi operacyjnych nauce do tworzenia modeli, które są opisem prostych i złożonych zjawisk rzeczywistych. Przedstawia się pionierskie badania, między innymi, Alfreda N. Whiteheada (1861-1947), D'Arcy W. Thompsona (1860-1948) oraz Norberta Wienera (1894-1964), które dały podstawy do stworzenia matematycznych modeli opisujących procesy budowania formy przez Naturę. Dziś digitalizacja procesów obliczeniowych sprawiła, że te złożone, często nieliniowe procesy rzeczywiste można opisać przez modele matematyczne. Grafika komputerowa zaś stała się pomocna przy obrazowaniu przebiegu tych procesów. Obecnie następuje pewna wymiana idei i technik między architekturą a dyscyplinami takimi jak biologia, fizyka, chemia i matematyka aby naśladować rozpoznane procesy. Uwaga koncentruje się na naturalnych procesach formacji i adaptacji jakie zachodzą w przyrodzie, na instrumentalizacji tych procesów poprzez modele matematyczne i techniki obliczeniowe oraz ich symulacjach i wizualizacjach cyfrowych.

Abstract

The models provided by Nature have been an inspiration for building forms since time immemorial. These forms have represented a kind of bridge between men and their natural environment. Today, from Nature we learn about efficient energy and material management, we find effective engineering solutions and structural designs for new building materials. We also learn the ways in which the natural and built environments could best interact with each other. In order to create designs, as Nature does in its environment, it is important to understand what the emergence, natural form-shaping processes, are, and to know how to use mathematics to describe these processes in the ways which are useful to designers. This means that it is necessary to learn the rules and dynamics of the organization and interaction of natural systems, as well as mathematical laws that describe these systems and can be used to build similar, yet artificial systems.

The article features how mathematics provides operational tools to science in order to create models that are a description of both simple and complex real phenomena. It presents pioneering studies of, among others, Alfred N. Whitehead (1861-1947), D'Arcy W. Thompson (1860-1948), and Norbert Wiener (1894-1964), which gave rise to the creation of mathematical models describing the processes of building forms by Nature. Today, digitization of computational processes led to these complex, often non-linear real processes being described by mathematical models. Computer graphics has become useful when imaging the course of these processes.

Currently, there is some exchange of ideas and techniques between architecture and other disciplines such as biology, physics, chemistry and mathematics to mimic the identified processes. The focus is mainly on natural processes of formation and adaptation which occur in nature, on the instrumentalization of these processes through mathematical models and computational techniques, as well as on their simulations and digital visualizations.

Wzory, których dostarcza Natura były od zarania dziejów inspirujące dla form budowlanych. Formy te stanowiły rodzaj pomostu pomiędzy człowiekiem a właściwym mu środowiskiem przyrodniczym. Dziś uczymy się od Natury oszczędnego gospodarowania energią i materiałem, odnajdujemy w jej utworach efektywne rozwiązania inżynierskie i wzory struktur dla nowych materiałów budowlanych.

A także poznajemy sposoby, w jaki środowiska naturalne i zbudowane mogłyby ze sobą najlepiej współdziałać.

Aby projektować tak jak czyni to Natura w swoim środowisku, to istotne jest zrozumienie na czym polega emergencja, naturalne procesy formotwórcze oraz wiedzieć jak wykorzystywać matematykę do opisu tych procesów w sposób przydatny projektantom. Oznacza to, że należy poznać zasady i dynamikę organizacji i interakcji systemów naturalnych oraz prawa matematyczne, które opisują te systemy i mogą być zastosowane do konstruowania podobnych systemów sztucznych.

Matematyka dostarcza bowiem narzędzi operacyjnych nauce do tworzenia modeli matematycznych¹, które są opisem prostych i złożonych zjawisk rzeczywistych. Takie modelowanie służy do poznania danego procesu poprzez zastąpienie go uproszczonym układem, który odzwierciedla jedynie wybrane cechy procesu. Opis matematyczny modelu przedstawia się tu w postaci układu równań algebraicznych lub różniczkowych. Badane procesy opisują modele o złożonych parametrach, a zawarte w nich zmienne podlegają zmianom zarówno w czasie jak i w przestrzeni. Digitalizacja procesów obliczeniowych sprawiła, że wiele złożonych, często nieliniowych zjawisk rzeczywistości może być już opisane przez modele matematyczne. Grafika komputerowa zaś stała się pomocna przy obrazowaniu przebiegu modelowanych procesów.

Obecnie następuje pewna wymiana idei i technik między architekturą a dyscyplinami takimi jak biologia, fizyka, chemia i matematyka aby naśladować rozpoznane procesy. Uwaga koncentruje się głównie na naturalnych procesach formacji i adaptacji jakie zachodzą w przyrodzie, na ich instrumentalizacji przez modele matematyczne i techniki obliczeniowe, ich symulacje i wizualizacje cyfrowe.

Emergencja i architektura

Emergencja (łac. *emergo* - wynurzam się) jest pojęciem, które występuje w wielu dyscyplinach, a silnie powiązane jest z biologią ewolucyjną, sztuczną inteligencją, teorią złożoności, cybernetyką, a ogólnie z teorią systemów. Jest to słowo, coraz częściej występuje w dyskursie architektonicznym, gdy mowa o złożoności, lecz nie zawsze podawane jest znaczenie tego terminu i matematyczne instrumenty naukowe. Będąca w powszechnym użyciu najprostsza definicja emergencji mówi o właściwościach systemu, których nie można wydedukować z jego komponentów, gdyż są one czymś więcej niż sumą jego części. Opis ten jest prawdziwy w bardzo ogólnym sensie lecz zbyt ogólnikowy aby wykorzystywać go w celach badawczych w projektowaniu architektury. Można też, ująć to tak, że każdy wyższy poziom własności może być opisany jako konsekwencja niższych poziomów własności.

W nauce termin *emergencja* odsyła do wytwarzania form i zachowań przez systemy naturalne, które posiadają nieredukowalną złożoność, a także do matematycznego podejścia niezbędnego w modelach takich jak procesy w środowiskach obliczeniowych.

Forma i zachowanie wyłaniają się z procesów zachodzących z systemach złożonych. Procesy wytwarzają, rozwijają i utrzymują formę systemów naturalnych, a także uwzględniają dynamiczną wymianę ze środowiskiem. Procesy samo-generacji formy, jak i samą formę opisują podstawowe wzory. Geometria odgrywa tu rolę lokalną i globalną, a także powiązaną jest ze wzorem dynamicznym oraz wzorem formy w samoorganizującej się morfogenezie.

Formy utrzymują swoją ciągłość i integralność przez zmienność aspektów swoich zachowań i ich iterację przez wiele generacji. Formy istnieją w różnorodnych populacjach, a tam gdzie zachodzi komunikacja między formami to wynikiem jest konstruktywne zachowanie kolektywne i pojawia się inteligencja.

Systemy z których wyłania się forma oraz systemy wewnątrz złożonych form osobniczych utrzymują się w wyniku przepływu energii i informacji przez system. Wzór przepływu posiada stałe zmiennie regulowane tak aby utrzymać stan równowagi przez 'sprzężenie zwrotne' ze środowiskiem. Ewolucja naturalna nie jest pojedynczym systemem lecz rozdzielonym na wiele współewoluujących systemów o częściowej autonomii i następuje przez interakcję. Nowopowstała forma jako całość

¹ W nauce model to celowo, uproszczona reprezentacja rzeczywistości. Model matematyczny to skończony zbiór symboli i relacji matematycznych oraz ścisłych zasad operowania nimi, przy czym zawarte w modelu symbole i relacje mają interpretację odnoszącą się do konkretnych elementów modelowanego wycinka rzeczywistości. Zbiór symboli i relacji matematycznych jest tworem abstrakcyjnym, a czynnikiem przekształcającym go w model matematyczny jest fizyczna interpretacja. Patrz: J. Gutenbaum, *Modelowanie matematyczne systemów*, wyd. III, Instytut Badań Naukowych PAN, Warszawa 2003.

może być komponentem systemu wyłaniającego się na wyższym poziomie – a to co jest systemem dla jednego procesu może być środowiskiem dla innego. Emergencja posiada wielką wagę dla architektury, domaga się poważnej rewizji sposobu w jaki powstają projekty.

Proces i forma

Żywe organizmy mogą być postrzegane jako systemy, które rozwijają złożone formy i wzory zachowań poprzez interakcję swoich komponentów w przestrzeni i w czasie. Dynamika rozwoju form biologicznych, ze względu na wzrost i formę wraz z morfogenezą znalazła się w centrum uwagi bardziej niż teoria ewolucji niż tezy Darwina. Teorię dotyczące morfogenezy, tworzenia się form, które rozwijają się w przestrzeni i czasie nierozdzielnie splatają się z matematyczną teorią informacji, z fizyką i chemią oraz z organizacją i geometrią. Stają się spójnym wzorem ułożonym przez pojęcia i ekonomikę technologii oraz przemysł.

Zbieżność linii myśli w biologii i matematyce została zapoczątkowana w pierwszej dekadzie XX w. szczególnie w pracach Alfreda N. Whiteheada (1861-1947) i D'Arcy W. Thompsona (1860-1948). Thompson zoolog i matematyk, patrzył na materię żywych form jak na diagram sił, które w nich działają utrzymując życie². Jego obserwacje homologii³ między czaszkami, miednicami, a roślinami różnych gatunków sugerowały nowy sposób analiz, czyli matematyzację biologii. Pomiary cech morfologicznych są właściwe dla danego gatunku, a czasem dla osobników należących do jednego gatunku. Stąd pomiary te są różne, lecz są warstwy, które niczym się nie różnią i one stanowią homologie. *Nota bene* współczesna ewolucyjna biologia rozwoju (Evo-Devo) wprowadziła nowe kryteria homologii. Jest nią homologia uzyskana w wyniku ustalenia lokalizacji białka określonego genu lub prokursora określonego białka. Zatem, homologia to zachowanie ciągłości informacji jak ujął to Leigh Van Valen (1935-2010) prowadzący badania z zakresu biologii molekularnej⁴.

Homologia posiada dwie odrębności lecz pokrewne znaczenia: w biologii oznacza organy czy ciało, które mają taki sam początek ewolucyjny lecz różne funkcje; a w matematyce jest to klasyfikacja figur geometrycznych zgodnie z ich własnościami. Stąd homologia może być opisywana przez dane matematyczne, mapowanie punktów w trójwymiarowym układzie współrzędnych w przestrzeni, przez wymiary, kąty i promienie krzywizn. Wykonane przez D'Arcy Thompsona porównania form spokrewnionych w systematyce rodzajów ukazują jak przechodzą rozpoznawalne deformacje w jednej formie do innej formy. Formy są spokrewnione jeśli jedna może być deformowana w inną, przez transformację kartezjańskiego układu współrzędnych. Analizy porównawcze ujawniają, że nie ma znaczenia to co jest pominięte w każdej pojedynczej deskrypcji formy, nie też znaczenia dokładność pomiaru, istotne jest tylko, że jest to morfogenetyczna tendencja między formami. Niemal w tym samym czasie matematyk, fizyk i filozof Alfred N. Whitehead (1861-1947) dowodził, że proces morfogenetyczny bardziej niż substancja jest fundamentalnie konstytuującym świat, że Natura składa się ze współdziałających z sobą wzorów aktywności. Organizmy są plikiem związków, które podtrzymują się na wzajem by modyfikować swoje własne zachowania w przewidywaniu zmian wzorów aktywności wszystkiego wokół nich. Antycypacja i reakcja napędzają dynamikę życia⁵.

Połączenie tych hipotez jest istotne gdyż uświadamia, że forma wyłania się z procesu. Jest to proces, który wytwarza, rozwija i podtrzymuje formę lub strukturę organizmu biologicznego (i rzeczy niebiologicznych), a który składa się ze złożonych serii wymian między organizmem i środowiskiem. Ponadto, organizm posiada zdolności do utrzymywania ciągłości i integracji przez zmieniające się aspekty jego zachowań. Formy są spokrewnione przez morfogenetyczne tendencje co

² Patrz: D. W. Thompson. *On Growth and Form*. Cambridge University Press, 1961 (I wyd. 1917).

³ Termin homologia (gr. *homólogos* - zgodny) w biologii określa wspólne ewolucyjne pochodzenie struktur organizmów, zgodność organu lub jego części, a u zwierząt także zachowania wynikające z odziedziczenia po wspólnym przodku. Cechę występującą u dwóch gatunków uznaje się za homologiczną jeżeli występowała u ich wspólnego przodka. Dwie cechy nazywamy homologicznymi jeśli odpowiadają różnym etapom tej samej serii przemian (morfoklina). Patrz: W. Ullrich, *Zoopsychologia*. (Bibl. Problemów, t. 185), Warszawa 1973.

⁴ Dzięki stwierdzeniu homologii genów homeoboksowych mamy współcześnie mocny dowód na istnienie wspólnego przodka wszystkich Bilateria. Patrz: A. Urbanek, *Jedno istnieje tylko zwierzę. Myśli przewodnie biologii porównawczej*. Muzeum i Instytut Zoologii Polska Akademia Nauk, 2007.

⁵ por. M. Winstock, *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*, AD vol.74, no 3. May-Jun 2004, s. 13. oraz A. N. Whitehead, *Nauka i świat nowożytny*, Kraków, 1987.

sugeruje, że są takie same, jeśli nie wszystkie z tych charakterystyk są podatne na modelowanie matematyczne. Idee te są szczególnie istotne dla projektantów, zwłaszcza gdy w ostatnich latach architektura i inżynieria zajmuje się procesami projektowania generatywnego w środowiskach fizycznych i obliczeniowych.

Wzory, zachowanie i samoorganizacja

Forma i zachowanie wchodzą z sobą w zawile związki. Forma organizmu wpływa na jego zachowanie w środowisku, a poszczególne zachowania będą wytwarzać różne skutki w różnych środowiskach albo gdy w tym samym środowisku wystąpią inne formy. Zachowanie jest nieliniowe a kontekst określony. Matematyczne deskrypcje zachowania zostały odnalezione przez Norberta Wienera (1894-1964) w opracowaniach Whiteheada a dotyczące „antycypacji i odpowiedzi”. W latach 40. ubiegłego wieku Wiener opracował pierwszą matematyczną deskrypcję ujmującą systematykę reaktywnych zachowań u maszyny i u zwierzęcia⁶ dając teoretyczne podstawy współczesnej cybernetyki. Przedmiotem jej były obiekty – układy (systemy), w których zachodzą procesy sterowania (regulacji, kierowania) i informowania, zaś metodą – modelowanie matematyczne. Otwierała się nowa droga dla rozwiązania wielu problemów praktycznych, a nie tylko technicznych. Cybernetyka angażując matematykę do opisu reaktywnych zachowań tworzy ogólną teorię obejmującą maszyny, organizmy i zjawiska trwające w czasie. Wykorzystywane są digitalne i numeryczne procesy, w których kawałki informacji oddziałują na siebie a transmisja informacji jest optymalizowana. Sprzężenie zwrotne jest rozumiane jako rodzaj urządzenia „sterującego”, które reguluje zachowanie, wykorzystując informacje ze środowiska wobec pomiaru faktycznego, zadanego lub optymalnego⁷.

Prace naukowe z termodynamiki prowadzone przez Ilya Prigogine (1917-2003) rozciągają ten obszar na drugie prawo termodynamiki⁸. Wyprowadzenie z dobrze udokumentowanych studiów wzory formacji i samoorganizacji wykorzystywał w eksperymentalnych badaniach oraz analizach teoretycznych systemów biologicznych i niebiologicznych. Twierdził, że wszystkie organizmy biologiczne i wiele naturalnych nieożywionych systemów jest utrzymywane przez przepływ energii przez system⁹. Wzór przepływu energii obejmuje wiele małych zmian, które są modyfikowane przez sprzężenie zwrotne ze środowiskiem dopóki nie zachowana zostanie równowaga lecz czasem występuje taka amplifikacja, taka że system może się reorganizować albo rozpaść. Nowy porządek wyłania się z chaosu tego systemu w punkcie jego rozpadu. Taka reorganizacja tworzy bardziej złożone struktury przez wyższy przepływ przez nie energii i jest to zwrot ku większej podatności na fluktuacje, a później na rozpad lub reorganizację.

Procesy przystosowawcze w systemach naturalnych dostarczyły pojęć inicjatywnych dla algorytmów genetycznych, pomocnych w projektowaniu sztucznych systemów opartych na naturalnych¹⁰. Algorytmy genetyczne są powszechnie wykorzystywane dziś w aplikacjach kontroli i optymalizacji oraz modelowaniu systemów ekologicznych. Modele matematyczne i siatki Booleana pozwalają na symulacje działania genów. Mogą one wytwarzać na modelach dyferencje tkanek i organy. Stuart A. Kauffman twierdzi, że samoorganizacja wytwarzana przez takie siatki jest bardziej komplementarna niż darwinowska selekcja przez dostosowanie do środowiska¹¹. Działanie atraktorów periodycznych w

⁶ Patrz: N. Wiener, *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York 1948, także: N. Wiener, *Cybernetyka czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie*. PWN, Warszawa 1971, s. 261.

⁷ Patrz: C. E. Shannon, W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. 5 ed., University of Illinois Press (Chicago), 1963.

⁸ Drugie prawo termodynamiki: układ dąży do stanu, który może być w danych warunkach zrealizowany na jak największą liczbę sposobów; dąży więc on do maksymalizacji entropii. Noblista Ilya Prigogine przyczynił się znacząco do zrozumienia procesów nieodwracalnych, szczególnie w systemach dalekich od równowagi. Skutki jego prac nad strukturami rozpraszającymi pobudziły wielu naukowców na świecie i miały konsekwencje dla współczesnego rozumienia systemów biologicznych. Prigogine był współtwórcą teorii chaosu. Patrz: I. Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, John Wiley (Chichester), 1967.

⁹ Por. M. Winstock, op. cit., s. 14.

¹⁰ J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial System. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge, MA, 1992.

¹¹ Por. S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organisation and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993, 373–376, 444–454. Patrz także tegoż: *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organisation*

siatkach genetycznych, proponowane przez Kauffmana, rozwiązuje dziś problem symulacji dynamicznych procesów genowych w modelu morfogenezy Cumminga¹².

Koncepcje i techniki matematyczne do wytwarzania kolektywnych zachowań, od prostych lokalnych reakcji, mają wystarczający potencjał, by radykalnie zmienić systemy środowiskowe w architekturze. Stosowane obecnie metody w tzw. inteligentnych budynkach wykorzystują hybrydowe systemy mechaniczne kontrolowane przez centralny komputer. Są mniej zaawansowane konceptualnie i często zawodne w działaniu. W organizmach naturalnych i symulacjach konceptualnych inteligentne zachowania wytwarzają samoorganizujące się systemy o zdolnościach dynamicznej dystrybucji danych. Na ich zastosowanie oczekuje architektura.

Tendencja do samoorganizacji systemów i do coraz większej złożoności, a każda reorganizacja będąca w momencie rozpadu w stanie równowagi systemów wychodzi poza energię relacji z n-organizmami i ich środowiskiem. Ewolucyjny rozwój pojawia się z dynamiki systemów. Każdy występujący fizycznie system, który może być opisany za pomocą narzędzi matematycznych lub zasad heurystycznych jest postrzegany jako system dynamiczny. Teoria systemów dynamicznych klasyfikuje systemy ze względu na narzędzie matematyczne, a nie widoczną formę systemu.

Geometria i Morfogeneza

Jednym z trzech fundamentalnych aspektów biologii rozwojowej jest morfogeneza (gr. *morphê* – kształt i *genesis* – tworzenie) i dotyczy kontroli wzrostu komórek i ich różnicowania się. Zajmuje się kształtem tkanek, organów i całego organizmu oraz położeniem różnie wyspecjalizowanych typów komórek. Teoretycy spierają się o ścisły związek morfogenezy z kodem genetycznym, lecz są argumenty dowodzące, że to nie forma organizmu jest zakodowana genetycznie lecz proces samoorganizacji formy w danym środowisku.

Geometria pełni subtelną rolę w morfogenezie. Istotne jest aby postrzegać geometrię form biologicznych lub form obliczeniowych nie tylko jako o opis pełnego rozwoju formy, ale także jako zbiór zwierający granice i przymusy, które działają jako lokalne zasady organizacji dla samo-organizacji podczas morfogenezy. Wzór i sprzężenie zwrotne są tak samo ważne w modelach morfogenezy jak i w modelach cybernetycznych i systemach dynamicznych.

Alan N. Turing (1912-1954) rozwinął geometryczną filotaksję¹³. Prowadzone przez niego badania rozwoju formy u roślin, pozwoliły na sformułowanie ogólnej teorii morfogenezy cylindrycznych siatek kratowych. Siatki te są formowane bardziej lokalnie niż globalnie, węzeł po węźle, a następnie modyfikowane przez wzrost. Aby zbudować model matematyczny tego procesu, trzeba mieć informacje o globalnej geometrii, charakterystyce cylindra, oraz zbiór lokalnych zasad dla węzłów siatki.

Turing przez wiele lat interesował się morfogenezą stokrotek i szyszek jodły z poligonalnymi symetrycznymi strukturami takim jak u rozgwiazdy, modulacją występującą w seriach liczb Fibonacciego w układzie liści na łodygach roślin, oraz formacją wzorów takich jak kropki lub paski. Jego proste wczesne modele morfogenezy¹⁴ demonstrują załamanie symetrii i jednorodności, albo emergencję wzoru z pierwotnie jednorodnej mieszaniny dwóch substancji. Równania matematyczne opisują te nieliniowe zmiany koncentracji dwóch chemikaliów (morfogenów) w czasie, a także jak te substancje chemiczne reagują i jak przebiega ich dyfuzja. Skłania to do hipotezy, że generowanie wzoru geometrycznego zaczyna się do gładkiej płytki komórek w której podczas rozwoju pojawiają się informacje o pąku, plamkowaniu skóry i konarach. Substancje chemiczne akumulują się aż nie osiągnięta zostanie ostateczna gęstość, wtedy działa morfogeneza żeby generować organy. Model reakcji dyfuzyjnej jest wciąż w zainteresowaniu biologii matematycznej, w której badania najbardziej koncentrują się na

and Complexity, Oxford University Press, 1995.

¹² Por. Micael Winstock, *Morphogenesis* op. cit., 16. Także: S. A. Kauffman, *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organisation and Complexity*, Oxford Univ. Press, 1995, 186–187.

¹³ Ulistnienie, filotaksja - sposób, w jaki liście rozmieszczone są na łodydze, z uwzględnieniem ich pozycji względem siebie. W przypadku, gdy z węzła wyrasta jeden liść mówi się o skrętoległym ustawieniu liści, wówczas linia łącząca ich nasady obiega łodygę spiralnie. Odmianą tego ulistnienia jest ulistnienie naprzemianległe. Jeżeli z węzła wyrasta kilka liści ulistnienie określa się jako okółkowe, które w przypadku 2 liści w węźle nazywa się naprzeciwległym lub nakrzyżległym. Przy naprzeciwległym ułożeniu liści wszystkie pary liści na łodydze znajdują się w jednej płaszczyźnie. Przy ułożeniu nakrzyżległym - oś pary liści ustawiona jest pod kątem 90 stopni w stosunku do pary leżącej poniżej.

¹⁴ Patrz: A. Turing, *The chemical basis of morphogenesis*, Philosophical Transactions, 1952.

powiązaniu dynamiki wzorów z formą. Model jakim posługiwał się Alan M. Turing reprezentował pojedynczą powierzchnię albo płaską płytkę komórek¹⁵. Obecne badania przy pomocy modeli obliczeniowych dla morfogenezy obejmują już procesy dotyczące płytek zakrzywionych¹⁶. Geometria jest nieodłączna w modelach tych procesów, uwzględnia „jednostki”, które wchodzą w dynamiczne związki każda z każdą, oraz informuje o globalnej geometrii.

Fred W. Cummings (ur. 1923) uzasadnia, że interakcja i dyfuzja morfogenów w warstwach komórkowych¹⁷ wywołują efekt gaussowski i wyznaczają krzywiznę poszczególnych membran lub warstw¹⁸ zatem zmiany w krzywiznie membrany będą powodować odwrotne zmiany w krzywiznie gdzie indziej. Sukces modeli obliczeniowych rozszerza obecnie to podejście i włącza matematykę krzywoliniowych siatek koordynacyjnych oraz wykorzystuje dynamikę płynów do symulacji morfogenetycznych organów asymetrycznych i rozgałęzień¹⁹. Składające się i wyginające się płaskie i zakrzywione płytki komórek są podstawa morfogenezy i aseksualnej reprodukcji.

Linie rodowe organizmów, które reprodukują się aseksualnie pokazują zbieżność ewolucji, podobne formy i właściwości wyłaniają się bez wspólnych przodków. W naturalnej morfogenezie są to wzory właściwe dla danego gatunku i dodawane są do zbioru operacji geometrycznych na modelach matematycznych²⁰. Zawila choreografia ograniczeń geometrycznych i procesów geometrycznych jest fundamentalna dla samo-organizacji w morfogenezach biologicznych. Modele obliczeniowe procesów morfogenetycznych mogą być adaptowane w badaniach architektonicznych, a samoorganizacja systemów materiałowych jest udowodniona w fizycznych procesach *form-finding*.

Dynamika dyferencjacji i integracja

Sprzężenie zwrotne jest nie tylko ważne dla utrzymania się formy w środowisku; to jest także użyteczna koncepcja w modelowaniu powiązania wzoru geometrycznego i formy podczas biologicznej morfogenezy. W modelach wzoru geometrycznego formy, sprzężenie zwrotne jest organizowane w dwóch pętlach: z formy do wzoru a ze wzoru do formy. W tych modelach nie ustrukturywane formacje o wzorze biochemicznym są przyczyną morfogenetycznych ‘przesunięć’ i w rezultacie transformacji w geometrii. Taka zmiana w geometrii zakłóca wzór i nowy wzór się pojawia, który inicjuje nowe przesunięcia morfogenetyczne. Proces ten kontynuowany jest aż do dystrybucji morfogenów i pozostaje w równowadze z geometrią ewoluującej formy. Pętla sprzężenia zwrotnego, od wzoru do formy i od formy do wzoru to matematyczny model morfogenezy²¹, model dynamicznego procesu, z którego wyłania się forma.

Cybernetyka, teoria systemów i złożoności mają wspólną bazę konceptualną, czego dowodem jest częste występowanie terminów takich jak „nauki o złożoności oraz „złożone systemy adaptatywne”. Występują one w rozległej literaturze z termodynamiki, w badaniach odnośnie sztucznej inteligencji, sieci neuronowych i systemów dynamicznych. Jeśli chodzi o matematykę, to także występuje wspólnotowe podejście do modelowania obliczeniowego i symulacji. Jest to aksjomatyczne w współczesnej cybernetyce, że dostrzegane są systemy o coraz większej złożoności, które w naturalnej ewolucji systemów ukazują coraz większą złożoności, od komórek do wielokomórkowych organizmów, od systemów społecznych i kultury.

Teoria systemów twierdzi, że koncepcje i zasady organizacji w systemach naturalnych są zależne

¹⁵ Więcej o modelach Turinga patrz: S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organisation and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993, s. 566-577.

¹⁶ Chodzi tu o matematyczną morfogenezę w stereodynamice molekularnej. patrz: Ch. J. Marzek, *A pragmatic approach to modeling morphogenesis*. Journal of Biological Systems, Vol. 7. 2. 1999.

¹⁷ Patrz: L. G. Harrison, M. Kolar, *Coupling between reaction diffusion and expressed morphogenesis*, Journal of Theoretical Biology, 130, 1988, A. Hunding, S. A. Kauffman, B. C. Goodwin, *Drosophila segmentation: supercomputer simulation of prepattern hierarchy*, Journal of Theoretical Biology, 145, 1990.

¹⁸ Patrz: F. W. Cummings, *A pattern surface interactive model of morphogenesis*, Journal of Theoretical Biology, 116, 1985; *On surface geometry coupled to morphogen*, Journal of Theoretical Biology, 137, 1989, 1990; *A model of morphogenetic movement*, Journal of Theoretical Biology, 144, 1990.

¹⁹ Patrz: C. H. Leung, M. Berzins, *A Computational Model for Organism Growth Based on Surface Mesh Generation*, University of Leeds, 2002.

²⁰ Por. M. Winstock, op. cit., s. 15.

²¹ patrz: A. V. Spririv, *The change in initial symmetry in the pattern-form interaction model of sea urchin gastrulation*, Journal of Theoretical Biology, 161, 1993.

od domen właściwych dla każdego pojedynczego systemu, a współczesne badania koncentrują się na „złożonych systemach adaptacyjnych”, która są samoregulujące. To co jest wspólne to studia organizacji, to znaczy struktury i funkcji. Teoria złożoności²² formalizuje matematyczną konstrukcję tego procesu w systemach, z których wyłania się złożoność. Skupia się na skutkach wytwarzanych przez kolektywne zachowania wielu prostych jednostek, które oddziałują na siebie nawzajem, tak jak atomy, molekuły lub komórki. Złożoność ta jest niejednorodna, gdyż znajduje się wiele różnorodnych części, które mają wielorakie powiązania między nimi, a części te zachowują się różnie, chociaż nie są samodzielne. Złożoność wzrasta kiedy wzrasta zróżnicowanie (różnica) i uzależnienie (połączenie) części. Proces wzrostu zróżnicowania nazywa się dyferencjacją, a proces wzrostu liczby lub siły powiązań nazywa się integracją. Ewolucyjne procesy dyferencjacji i integracji oddziałują na siebie w wielu „skalach”, od formacji i struktury pojedynczych organizmów do gatunków i ekosystemów.

Zachowania kolektywne

Zachowanie kolektywne półautonomicznych pojedynczych organizmów jest widoczne w dynamice grupy społecznej wielu gatunków naturalnych. Stada ptaków, ławice ryb wytwarzają to co pojawia się jako spójna forma albo układ (szyk), bez lidera lub centralnie ukierunkowującej inteligencji. Insekty takie jak pszczoły i termity wytwarzają złożone budowlane artefakty i wysoce zorganizowane funkcjonalne specjalizacje bez centralnego planowania lub instrukcji. Strukturalne zachowania pojawiają się z repetycji i interakcji prostych zasad. Modele matematyczne wyprowadzone ze zjawisk naturalnych, opisują układy pojedynczych „czynników” i jednostek albo komórek o bardzo prostych procesach wewnętrznych, opisują proste ich interakcje. Złożone wzory i wyniki pojawiają się z dystrybucji danych i powiązań modeli dynamicznych. Rozległe studia Stephena Wolframa (ur.1959) o utomatygowaniu komórkowym²³ dają pełne wyliczenie ich charakterystyk i potencjału. Studia te i symulacje ewolucji i co-adaptacji są szczególnie skuteczne w rozkładowych modelach.

Prowadzone obecnie w Santa Fe Institute prace i badania naukowe wykorzystują jednorodne siatki wzajemnie oddziałujących czynników, po to żeby studiować samo-organizację. Celem jest opracowanie komputerowej (obliczeniowej) symulacji życia, angażując aktywność genu, dynamikę molekularną, morfogenezę i cykle życia – wirtualne organizmy z realistyczną morfogenezą, które posiadają sztuczne życie.

Procesy przystosowawcze w systemach naturalnych, dostarczyły pojęć inicjatywnych dla pierwszych algorytmów genetycznych opracowanych przez Johna H. Hollanda (ur.1929) do projektowania sztucznych systemów w oparciu o naturalne²⁴. Algorytmy genetyczne inicjują i utrzymują populację jednostek obliczeniowych, każda z nich posiada genotyp i fenotyp. Seksualna reprodukcja jest symulowana przez selekcję losową z dwojga dostarczonych „rodziców”, z których jest wytwarzane „potomstwo”. Przez krzyżowanie (losowa alokacja genów genotypu rodziców) i mutacja, różnorodne potomstwo jest generowane aż wypełni się populacja. Wszyscy rodzice są odrzucani i proces jest iteratywny dla tylu generacji ile jest wymagane do wytwarzania populacji, która obejmuje odpowiednie jednostki spełniające kryteria sprawności. Są one szeroko wykorzystywane dziś w aplikacjach kontroli i optymalizacji oraz modelowania systemów ekologicznych.

Matematyczne symulacje działania genów w siatkach Booleana o różnej sile powiązań mogą wytworzyć w modelach dyferencjacje tkanek i organy. Stuard A. Kauffman twierdzi, że samoorganizacja wytwarzana przez takie siatki jest bardziej komplementarna niż darwinowska selekcja przez dostosowanie do środowiska²⁵. Rozwiązaniem problemu jak wytwarzać dynamiczne procesy genowe w modelu morfogenezy Cumminga jest proponowane przez Kaufmana działanie na periodycznych atraktorach w siatkach genetycznych²⁶.

Koncepcje i techniki matematyczne do wytwarzania kolektywnych zachowań od prostych lokal-

²² Patrz: W. Weaver, *Science and complexity*, American Scientist, 36, 536, 1948.

²³ Patrz: S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media (Illinois) 2002, oraz *Cellular Automata and Complexity*, *Collected Papers*, Addison Wesley (Reading, MA) 1994.

²⁴ Patrz: J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial System. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press (Cambridge Ma 1975).

²⁵ Por. S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organisation and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993, 373- 376, 444-454.

²⁶ Por. M. Winstock, op. cit., 16 także: S. A. Kauffman, *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organisation and Complexity*, Oxford University Press, 1995, 186-187.

nych reakcji mają potencjał by radykalnie zmienić architektoniczne systemy środowiskowe. Obecne metody stosowane w tzw. inteligentnych budynkach wykorzystujące hybrydowe systemy mechaniczne kontrolowane przez centralny komputer są mniej zaawansowane konceptualnie i często zawodne w działaniu. W organizmach naturalnych i symulacjach konceptualnych inteligentne zachowania wytwarzają samoorganizujące się systemy o zdolnościach dynamicznej dystrybucji danych oraz powiązań i na ich zastosowanie oczekuje architektura.

Modele samo-organizacji oparte na zmiennej dystrybucji i selekcji zostały przedstawione przez Francisa Heylighena (ur. 1960)²⁷. Uzasadnia on, że złożone systemy, takie jak organizmy i ekosystemy rozwijają się z interakcji elementów, które łączą się w różne „gromady”. Jedne z nich przyczyniają się do naturalnej selekcji całości formy, inne rozpadają się poddane dalszej ewolucji. Proces ten powtarza się na wyższych poziomach, nowopowstała całość na jednym poziomie staje się komponentem systemu pojawiającym się na wyższym poziomie²⁸. Ponadto, naturalna ewolucja nie dotyczy tylko pojedynczego systemu lecz dotyczy wielu systemów współ-systemów. Samoorganizacja ekosystemu jak i całość jest tak samo istotna jak wewnętrzna morfogenetyczna samoorganizacja.

W ostatnich latach opracowano modele w oparciu o fenotypy a nie genotypy lub aktywność genetyczną²⁹. Matematyk Ian Stewart (ur. 1945) udowadnia, że wszystkie samoorganizujące się systemy nie organizują się same przez się, lecz przez ich kontekst. Modelowanie ewolucyjne w tym podejściu koncentruje się na specjacji³⁰, dostosowaniu do krajobrazu i selekcji gatunkowej. Modele te przedstawiają nieliniowe i kolektywne efekty jak przełamanie symetrii przez bifurkację. Modele te są zbiorem zwykłych równań różniczkowych zaaranżowanych w siatce struktur. Jest to siatka topologiczna, która odzwierciedliła formę w tych równaniach. Rekombinacja prowadzi do mutacji przez wytwarzanie zróżnicowań w każdej generacji, a selekcja działa na pojedynczych organizmach w kontekście innych organizmów i środowiska.

Poszukiwania biologicznych modeli środowiskowych

W studiach nad samoorganizacją materiałową w strukturach biologicznych dopiero na początku XXI w. zaczęto akceptować pogląd, że ewolucyjny rozwój, przebiegający w dłuższym okresie czasu, optymalizuje i podnosi wydajność oraz wytrzymałość struktur. Teoria ewolucyjna została dokooptowana na poparcie poglądu, że systemy biologiczne nie stoją w opozycji wobec tradycyjnych koncepcji, zwłaszcza jeśli chodzi o wydajność i optymalizację. Koncepcje te ignorują wysoki stopień redundancji i złożoności w hierarchiach materiałowych struktur naturalnych czyli sposób dzięki któremu systemy biologiczne reagują i adaptują się do obciążeń dynamicznych i presji jakie wywiera na nie środowisko w jakim się znajdują³¹.

Zasady inżynierskie mogą być wyabstrahowane z systemów biologicznych i dostosowane do projektowania artefaktów i budowli, co znane jest jako proces biomimetyczny. Wymaga to głębszego zaangażowania w rozwój ewolucyjny oraz przeprowadzania analiz systemów organizacji materiałowych³², co wymusza poznawanie zachowań poszczególnych gatunków. Systemy biologiczne posiadają łatwość łączenia się i wykorzystywania słabych materiałów, po to aby uczynić z nich silne struktury o odpowiedniej dynamice i własnościach, a które odróżniają je od klasycznych struktur inżynierskich wykonywanych przez człowieka. Zachowanie wszystkich naturalnych systemów jest

²⁷ Patrz: F. Heylighen, *Self-organisation, Emergence and the Architecture of Complexity*, Proceedings of 1st European Conference on System Science, 1989.

²⁸ Patrz: H. A. Simon, *The Architecture of Complexity*, The Sciences of the Artificial, MIT Press Cambridge, Ma 1996.

²⁹ Patrz: I. Stewart, *Self-organisation in evolution: a mathematical perspective*, Philosophical Transactions, The Royal Society of London, 361, 2003.

³⁰ Specjacja, w biologii to proces powstawania gatunków. Chodzi tu o specjację właściwą, czyli proces, w którym musi nastąpić izolacja rozrodcza pomiędzy istniejącymi populacjami gatunku lub pomiędzy grupami osobników w populacji.

³¹ Wprowadzenie do wybranych aspektów dynamiki w systemach biologicznych w powiązaniu z architekturą patrz: G. Jeronimidis, *Biodynamics*, AD, Vol. 74, No 3, 2004, 90-95.

³² Więcej o badaniach struktur i właściwościach materiałów biologicznych obejmujące także inżynierię twardej i miękkich tkanek oraz inżynierię materiałów włóknistych patrz: M. Elice (red), *Structural Biological Materials*, Pergamon Press, Amsterdam 2000.

złożone i przystosowawcze. Zwłaszcza rośliny zarządzają swoimi zachowaniami strukturalnymi w sposób, który może dostarczać modeli dla konstrukcji inżynierskich. Rośliny pokonują grawitację pnąc się górę i przenoszą obciążenia wiatrowe dzięki organizmom materiałowym w różnych sekcjach łodygi. Wykorzystują do tego niewielkie ilości „miękkich” materiałów na każdym poziomie organizacji żeby osiągnąć cele konstrukcyjne. Rośliny są strukturami hierarchicznymi zrobionymi z materiałów, które cechują się delikatnością i te własności potrafią być zmieniane przez roślinę odpowiednio do naprężeń lokalnych lub globalnych.

Redundancja i dyferencjacja

W klasycznej inżynierii redundancja stoi w sprzeczności z wydajnością, lecz jest ona istotną strategią w biologii, gdyż bez redundancji nie byłaby możliwa adaptacja odpowiednio do zmian środowiskowych. W systemach biologicznych redundancja jest podstawową strategią ewolucyjną stąd wielokomórkowe organizacje rozwinęły się z pozornie bardzo sprawnych jednokomórkowych organizmów. Różnicowanie komórkowe i wielokrotna hierarchiczna aranżacja komórek powoduje, że zsumowane komórki stają się podstawowym komponentem organizacji wyższego poziomu o dodatkowej złożoności i wzroście funkcjonalności. Redundancja w strukturach biologicznych nie oznacza tylko tego że system posiada więcej komórek udostępniionych do działania w każdej tkance niż wymaga tego pojedyncze zadanie, lecz także iż organizacja hierarchiczna komórek jest tak zaaranżowana, że tkanka ma wystarczającą nadwyżkę zdolności adaptacyjnych do zmian pod wpływem naprężeń środowiskowych. Redundancja odpowiada koncepcji nieredukowalnej złożoności.

Biologia ewolucyjna wykorzystuje redundancję jako poważną strategię wprowadzaną na wielu poziomach w wielokrotnych i złożonych aranżacjach i różnicowaniach materiałowych, żeby osiągnąć zdrowe i trwałe struktury podczas gdy inżynieria ma tradycyjalne postrzeganie osiągania minimum materiałowego, prostoty, organizacji strukturalnej raz standaryzacji komponentów i ich elementów.

Na długiej drodze ewolucji, złożoność żywych systemów oraz różnorodność tych systemów rozwijała się jako odpowiedź na presję środowiskowe i niestabilności. Organizmy, które mają zdolność do adaptacji przez redundancję mogą przetrwać niestabilności środowiska; zaś te, które są nazbyt dostosowane – „wydajność/sprawność projektu – nie przetrwają jeśli w środowisku pojawiają się nowe niestabilności. Ta ważna zasada adaptacyjna nie była dostrzegana w klasycznej inżynierii, niewielkie przypadkowe zmiany w projekcie, powtarzane co jakiś czas. To jest stochastyczny proces, który wytwarza zdrowe systemy, które trwają w czasie. W matematyce termin stochastyczny jest przeciwieństwem terminu deterministyczny. Procesy deterministyczne odpowiadają takiemu modelowi matematycznemu, którego opis nie zawiera żadnego elementu losowości. Oznacza to, że ewolucja procesów deterministycznych jest z góry przesądzona i zależy wyłącznie od parametrów początkowych lub ich wartości poprzednich. Natomiast procesy stochastyczne opisują funkcje matematyczne, których wartości leżą w przestrzeni zdarzeń losowych. Czyli w procesach stochastycznych nigdy nie będą powtarzać się dane wprowadzone na wejściu.

Zatem przebieg opracowywanych procesów, które obejmują przypadkowe, niewielkie mutacje, obok wielu iteracji, oznacza ‘ewolucyjną’ strategię w projektowaniu. Pozwoli ona architekturze i inżynierii wykluczać standaryzację komponentów i ich składowych. W nauce termin żywotny jest używany do opisywania systemu, który może przeżyć ekstremalne zmiany zewnętrzne, a to jest charakterystyczne dla „silnych” systemów, które nie są szczególnie wrażliwe na zmiany parametrów początkowych. „Wytrzymałość” w systemach żywych jest wytwarzana na poziomie genetycznym. Kod genetyczny może być opisywany jako kanoniczny mogący przetrwać niezwykle długie okresy czasowe, lecz za każdym razem ulega tłumaczeniu” na kolejne sekwencje aminokwasów w ich białkach w procesie biosyntezy białek czyli translacji - procesu doprowadzającego do wytworzenia w pełni funkcjonalnych cząsteczek. Jest to rodzaj samo-organizacji na wyższym poziomie łączenia się i różnicowania, który może kopiować niewielki błąd wytwarzający mutacje, który wystarcza by zapewnić zmiany w populacji. Zatem każdy pojedynczy element tej populacji będzie odpowiadał głównym „parametrom projektowym”, będąc jednocześnie identyczny topologicznie, lecz różnym osobniczo. Ten odporny projekt naturalnego żywego systemu nie został wytworzony przez optymalizację i standaryzację, lecz przez redundancję i różnicowanie.

Wszystkie formy biologiczne łączą się z sobą, a robią to pod działaniem sił obciążeń grawitacyjnych, kiedy to jest konieczne gromadzą swoje materiały i energię ze swojego środowiska.

Biologiczna samoorganizacja ma miejsce pod stresem obciążeniem. Jeśli wzrost pod stresem jest powszechny, to podąża za geometrią morfologiczną i organizacją komórkową, która pozwala roślinom odpowiadać na naprężenia od obciążeń, co jest także powszechne. Zdziwiająco są wzory jakie ukazują wszystkie systemy naturalne oraz częstotliwość i występowanie pewnych wzorów geometrycznych (w szczególności trójkątów, pentagonów i spiral) w wielu różnych organizacjach i dywergentnych skalach. Te wzory są gatunkowe, zatem można powiedzieć, że samoorganizacja biologiczna jest u podstaw geometryczna, co także oznacza, że dla tego samego zestawu materiałów jest wspólna.

Najważniejszą cechą biologicznej samo-organizacji jest to, że małe, proste komponenty łączą się z sobą w trójwymiarowe wzory, tworzą w formy o wyższej organizacji. Formy te samolączą się w bardziej złożone struktury, które posiadają emergentne właściwości i zachowania³³.

Formy biologiczne są systemami wewnątrz systemów, hierarchicznie zaaranżowanymi semi-autonomicznymi organizacjami; każda z nich osiąga swoje funkcje, lecz także posiada wystarczający zasób możliwości, tak więc bierze udział w reagowaniu organizacji globalnej. Aby to osiągnąć każdy poziom organizacji wymaga zróżnicowania i redundancji. Taki przypadek ewolucyjnych korzyści nadanych przez dyferencjacje i redundancje jest przekonujący. Jakkolwiek nie ma jeszcze studiów szczegółowych tych korzyści dla poszczególnych struktur biologicznych.

Studia emergentnych technologii w pracach badawczych rozpoczynać należy od analiz zintegrowanych morfologii roślin w poszukiwaniu takich systemów, na podstawie których można by opracować systemy budowlane. Zapisy ilościowe i modele cyfrowe są wartościowane w zrozumieniu strukturalnego obrazu roślin, a konstrukcje stosowane w modelach cyfrowych umożliwiają przez eksperymenty analizy i symulacje. Modelowanie i analizy systemów roślin pozwalają na nowe rozumienie zachowań emergentnych, miejsca komponentu w hierarchii i strategii adaptacyjnych struktur biologicznych, oraz pozwalają na mechaniczny wzrost lub wytwarzanie naprężeń.

W projektowaniu generatywnym zaś można wykorzystywać, modele matematyczne ujmujące formy i struktury powstające w procesach morfogenetycznych w środowiskach obliczeniowych. Kryteria dla selekcji „sprawności” można opracować tak, aby pokrywały się z żądaniami skuteczności architektonicznej włączając integralność strukturalną i „zdolność budowlaną”. Chociaż strategię te nie w pełni odpowiadają naturalnej ewolucji, to obejmują iteracje fizycznego (fenotypowego) modelowania łącznie z efektami samoorganizacji materiałowej w metodzie zwanej *form-finding* oraz logiką wytwarzania przemysłowego udostępnioną przez technologie CNC w maszynach tnących i modelujących.

Metoda *form finding* naśladując procesy zachodzące w Naturze może być pomocna przy odkryciu poprawnego sposobu w jaki powinien być zorganizowany budynek. Jako studium zdolne do okrywania optymalnej formy, dynamicznych zdolności adaptacyjnych i ujawniania unikatowych związków sprawia, że tak powstała architektura odróżnia się od innej. Piękno takich obiektów nie zostało zaprojektowane. Jest taką samą własnością jakie posiadają formy naturalne, które wyłaniają się z procesów. Ich piękno tkwi, nie w estetyce, lecz sposobie w który forma zostaje powołana, w różnych skalach i układach materiałowych. Pier L. Nervi wielokrotnie podkreślał, że trudno jest podać powody dla których następuje szybka akceptacja form, które docierają do nas ze świata Natury³⁴.

Zauważyć należy, że dochodzenie do estetyki wzorów samoorganizacji jest wynikiem matematycznych i proceduralnych procesów formacji jako takiej. Wzory i kształty w Naturze otwierają szeroki wachlarz możliwości studiowania nowych metod projektowania architektonicznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. W. Cummings, *A pattern surface interactive model of morphogenesis*, Journal of Theoretical Biology, 116, 1985.
- [2] M. Elice (red), *Structural Biological Materials*, Pergamon Press, Amsterdam 2000.
- [3] F. Heylighen, *Self-organisation, Emergence and the Architecture of Complexity*, Proceedings of 1st European Conference on System Science, 1989.

³³ Przykładem emergentnych właściwości ludzkiej tkanki jest mechaniczne zachowanie skóry. Kiedy skóra staje się naciągnięta jej opór zwiększa się wraz ze wzrostem naprężenia gdyż komponenty skóry coraz bardziej układają się w kierunku tych naprężeń – odpowiada to naprężeniom znanym jako sztywnienie liniowe.

³⁴ P. L. Nervi, *Aesthetics and Technology in Building, The Charles Eliot Norton Lectures, 1961-1962*, Harvard University Press, Cambridge Ma, 1965, s. 27.

- [4] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial System. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge Ma 1975.
- [5] J. Gutenbaum, *Modelowanie matematyczne systemów*, wyd. III, Instytut Badań Naukowych PAN, Warszawa 2003.
- [6] G. Jeronimidis, *Biodynamics*, AD, Vol. 74, No 3, 2004, 90-95.
- S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organisation and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993.
- [7] S. A. Kauffman, *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organisation and Complexity*, Oxford University Press, 1995.
- [8] C. H. Leung, M. Berzins, *A Computational Model for Organism Growth Based on Surface Mesh Generation*, University of Leeds, 2002.
- [9] I. Stewart, *Self-organisation in evolution: a mathematical perspective*, Philosophical Transactions, The Royal Society of London, 361, 2003.
- [10] H. A. Simon, *The Architecture of Complexity*, The Sciences of the Artificial, MIT Press Cambridge Ma 1996.
- [11] A. Turing, *The chemical basis of morphogenesis*, Philosophical Transactions, 1952.
- [12] A. Urbanek, *Jedno istnieje tylko zwierzę. Myśli przewodnie biologii porównawczej*. Muzeum i Instytut Zoologii Polska Akademia Nauk, 2007.
- [13] N. Wiener, *Cybernetyka czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie*. PWN, Warszawa 1971.
- [14] A. N. Whitehead, *Nauka i świat nowożytny*, Kraków 1987.
- [15] M. Winstock, *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence*, AD vol.74, no 3. May-Jun 2004.
- [16] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media (Illinois) 2002.