

Systemy i narzędzia generatywne Generative systems and tools

Krystyna Januskiewicz
WA Politechnika Poznańska

Słowa kluczowe: systemy generatywne, narzędzia cyfrowe, projektowanie, architektura

Keywords: generative systems, digital tools, designing, architecture

Streszczenie

Projektowanie generatywne to wykorzystywanie procesów algorytmicznych lub reguł i zasad po to, aby otrzymać rozwiązania projektowe. Korzystanie z narzędzi generatywnych w projektowaniu wymaga od architekta innego niż dotąd podejścia do procesu twórczego. Jest to istotna zmiana, gdyż teoria i praktyka architektury jak dotąd koncentrowała się przede wszystkim na formie, a nie na procesie wyłaniającym formę. Te nowe aspekty w kreacji formy architektonicznej praz pierwszy w Polsce badał Adam M. Szymcki. Obecnie architekci, chcąc badać wpływ różnych czynników na formę, sięgają po cyfrowe systemy i narzędzia generatywne. Zapożyczają je z innych dyscyplin i wykorzystują do projektowania obiektów i materiałów budowlanych. Najchętniej stosowane, to: diagramy Voronoi, L-Systemy, automaty komórkowe (*Cellular Automata*), fraktale, gramatyki kształtu (*Shape Grammars*) i algorytmy genetyczne. Przy użyciu tych narzędzi można otrzymać interesujące formy i rozwiązania przestrzenne, które zostały przedstawione w tym artykule.

Abstract

Generative design is the use of algorithmic processes or rules and regulations in order to receive design solutions. Using generative tools in the design requires a different approach to the creative process than ever before. This is a significant change, as the theory and practice of architecture has so far focused primarily on the form, not on the form-emerging process. These new aspects in the creation of the architectural form were first studied in Poland by Adam M. Szymcki. Currently, the architects, in order to investigate the influence of various factors on the form, resort to digital tools and generative systems. They borrow them from other disciplines and use them to design buildings and building materials. The most often used include: Voronoi diagrams, L-System, Cellular Automata, fractals, Shape Grammars and genetic algorithms. Using these tools one can get interesting forms and spatial solutions, which have been presented in this article.

Projektowanie generatywne to wykorzystywanie procesów algorytmicznych lub reguł i zasad po to, aby otrzymywać rozwiązania projektowe. Zasady dla systemów generatywnych mogą być określane w różny sposób, np. przez gramatyki werbalne, diagramy, transformacje geometryczne czy scenariusze poleceń. Systemy generatywne mają różne stopnie kontroli od zautomatyzowanej do manualnej, wykonywanej krok po kroku.

Ze względu na możliwość reprezentacji rozwiązań projektowych systemy generatywne można podzielić na trzy szerokie grupy:

- systemy analogowe, gdzie właściwości systemu są wykorzystywane do przedstawiania właściwości projektowanych obiektów. Takimi systemami analogowymi są systemy np. mechaniczne i elektryczne.
- systemy ikoniczne pomocne w tworzeniu alternatywnych rozwiązań projektowych przez przydzielanie operacji takich, jak: dodawanie, odejmowanie, transformacja oraz przesunięcia tych części, które są zapisane.
- systemy symboliczne posługują się symbolami takimi jak słowa, liczby i formuły matematyczne, żeby reprezentować możliwe rozwiązania na wyjściu¹.

William Mitchell opracował Systematykę systemów generatywnych od Arystotelesa do Richarda S. Lulla (1867–1957), znanego z badań nad ewolucją. Wykazał on, że systemy te odgrywały także

¹ Por. Yehuda E. Kalay, William J. Mitchell, *Architecture's New Media: Principles, Theories, And Methods of Computer-aided Design*, MIT Press, 2004, 326.

istotną rolę w filozofii, literaturze oraz muzyce. W architekturze zaś systematyka ta odsyła do Leonarda da Vinci (1452-1519) i francuskiego architekta Jean-Nicolas-Louisa Duranda (1760–1834) profesora w École Polytechnique w Paryżu. W studiach zatytułowanych *Précis des Leçons d'Architecture données à l'école polytechnique* (1803-1805) Durand zaproponował innowacyjny sposób generowania rzutów i elewacji przez powtarzanie przez przekładanie części strukturalnych, takich jak ściany, fasady etc.² Elementy te miały stanowić system, w którym można było projektować nowe całości. Chodziło wtedy o projektowanie w stylach modnych w XIX w. w Europie i koloniach zamorskich. Takie podejście do projektowania zastosowane w praktyce ułatwiłoby sporządzanie dwuwymiarowych rysunków technicznych budowli, zazwyczaj o podobnych rozwiązaniach przestrzennych i bogatych w historyczne detale ozdobne.

Myślenie o systemie, jako o obiekcie, w którym można wyodrębnić zespół lub zespoły elementów wzajemnie powiązanych w układy stanowiące pewne całości nadrzędne występowało już wcześniej w różnych dyscyplinach nauki. Jednakże myślenie systemowe stało długo w opozycji wobec redukcjonistycznej koncepcji, która przez wieki cechowała podejście naukowców i inżynierów. Było czymś nowym, czymś co otwierało nowe terytoria badań. Jednakże dopiero w latach 30. ubiegłego stulecia ujawniła się potrzeba stworzenia jednolitego podejścia do systemu, zwłaszcza w naukach przyrodniczych, a później w naukach ścisłych. Po II wojnie światowej aktywnymi popularyzatorami tego nowego wówczas sposobu widzenia świata i rozwiązywania złożonych problemów byli Buckminster Fuller (1895-1983) w USA i twórca teorii systemów Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) w Europie.

W końcu lat 60. XX w. metodyka projektowania systemowego weszła do architektury i dotyczyła rozwiązywania głównie problemów funkcjonalnych i denotacji przestrzennej. Wyznaczała podstawowe zasady projektowania według definicji problemu, opisu celu i zadania projektowego w specyficznym obszarze twórczości architektonicznej. Stosowano modele logiczne, algorytmy oraz modele matematyczne, wykorzystywano dostępne wówczas techniki komputerowego wspomaganie projektowania, symulacji, optymalizacji i wielowariantowości rozwiązań projektowych. Była to konsekwencja stosowania aparatu matematyczno-logicznego w zakresie możliwej wtedy przydatności komputera w projektowaniu³ (patrz: AV 1/2012).

Korzystanie z narzędzi generatywnych w projektowaniu wymaga od architekta innego niż dotąd podejścia do procesu twórczego. Jest to istotna zmiana, gdyż teoria i praktyka architektury jak dotąd koncentrowała się przede wszystkim na formie, a nie na procesie wyłaniającym formę.

Te nowe aspekty w kreacji formy architektonicznej badał w Polsce Adam M. Szyski. Opierając się na wiedzy z zakresu nauk o człowieku, przeprowadził analizy porównawcze procesu twórczego i procesów projektowania systemowego. Podobnie jak Fuller, lecz we współczesny sposób, wykazał topologiczny charakter geometrii ich powiązań systemowych, niemożliwy do obrazowania na ówczesnym poziomie rozwoju technologii cyfrowych⁴.

Obecnie architekci, chcąc badać wpływ różnych czynników na formę, sięgają po cyfrowe systemy generatywne. Zapożyczają je z innych dyscyplin i wykorzystują do projektowania budowli i materiałów. Najchętniej stosowane, to: diagramy Voronoi, L-System, automaty komórkowe (*Cellular Automata*), fraktale, gramatyki kształtu i algorytmy genetyczne.

Diagramy Voronoi

Diagramy Voronoi umożliwiają dekompozycję przestrzeni i podział jej na regiony. Jest to rodzaj tessellacji obejmującej klasę wzorów nazwanych tesselacjami Dirichleta. Diagramy takie były już rozpatrywane przez Rene Descartesa, lecz nazwa ich pochodzi od nazwiska rosyjskiego matematyka Georgija Fiedorowicza Voronoi, który w 1907 zdefiniował i studiował n -wymiarowe przypadki tej tessellacji. Wszystkie obszary Voronoi są wielokątami wypukłymi. Każdy punkt w dowolnym obszarze jest generatywny i dzieli ten obszar na n -obszarów tak, że każdy punkt w dowolnym obszarze znajduje się bliżej określonego punktu ze zbioru n punktów niż od pozostałych $n - 1$ punktów. *Diagramy Voronoi* znajdują szerokie zastosowanie w biologii, grafice komputerowej, geofizyce,

² Por. op. cit., 328.

³ Metodyka projektowania systemowego w architekturze i urbanistyce lat 70. XX w. najlepiej została wyłożona, w: S. Latour, A. M. Szyski, *Projektowanie systemowe w architekturze*, PWN, Warszawa-Poznań, 1982.

⁴ Patrz: A. M. Szyski, *Twórczość architektoniczna. Wstęp do teorii projektowania systemowego (elements of system designing theory)*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, nr. 101, Szczecin, 1997 oraz B. R. Fuller *Synergetics, Explorations In geometry of Thinking*, Macmillan Publishing Co. Inc., 1975, 1979, poz. 900.10–900.33.

antropologii oraz w planowaniu urbanistycznym. *Diagramy Voronoi* używa się do generowania zarówno dwu-, jak i trójwymiarowych elementów, jak na przykład Benjamin Aranda i Chris Lasch w projekcie *Grotto* (2006), aby uzyskać efekt naturalnej jaskini.

L-System

W 1968 węgierski biolog Aristid Lindenmayer (1925-1989) prowadził badania nad modelami matematycznymi opisującymi proces wzrostu prostych organizmów wielokomórkowych. W tym samym roku zaczął pracować nad formalną deskrypcją wyników tych badań nazwaną Lindenmayer System albo L-system⁵. L-system jest tym co w informatyce nazwane zostało gramatyką formy, strukturą abstrakcyjną, którą opisuje język formy przez sekwencje różnych prostych obiektów zwanych sznurkami (ekwiwalent naturalnych chromosomów). Modelowanie roślin, opierając się na L-systemie, opisują dwa człony, czyli dwie kategorie gramatyki formalnej, a to: analityczna i generatywna. Gramatyka analityczna ustala czy sznurek należy do języka opisanego przez tę gramatykę. Natomiast gramatyka generatywna formalizuje algorytm, który generuje sznurki w określonym języku i składa się z zestawu przepisanych zasad transformujących sznurki, zaczynając od prostego symbolu startowego.

Korzystanie z L-systemu w grafice komputerowej wymaga przekładania symboli na struktury graficzne. W zależności od modelu stosuje się różne metody transferowania zapisu formalnego do grafiki. Jednym z przykładów jest tak zwana „grafika żółwia” (zbliżona do koncepcji wykorzystywanej w języku Logo). Każdy symbol w L-systemie jest w takim modelu interpretowany jako określona sekwencja ruchów „żółwia”.

L-system stanowi dziś podstawę dla struktur informatycznych symulujących procesy, jakie zachodzą nie tylko w świecie przyrody. System ten znalazł również praktyczne zastosowanie w generowaniu fraktali. Szczególnym przypadkiem są L-systemu jest system DOL (deterministyczny i bekontekstowy) oraz stochastyczny L-system któremu przypisane jest jakieś prawdopodobieństwo poprzez gramatyki stochastyczne.

Współczesne metody wykorzystujące osiągnięcia Lindenmayera umożliwiają przeprowadzanie procesów morfologicznych, adaptacjogenezy⁶ i wypierają eksperymenty przeprowadzane ręcznie. Architekci, jak Karl S. Chu i Emergent Design Group oraz OCEAN NORTH, wykorzystują L-System jako narzędzie do generacji form i struktur. L-System jest obiecującym narzędziem dla zainteresowanych alternatywnym podejściem do zrównoważonego rozwoju środowiska.

Automaty komórkowe

Automaty komórkowe (ang. *cellular automaton*, w liczbie mnogiej *cellular automata*) zostały wynalezione w latach 40. ubiegłego stulecia przez Stanisława Ulama (1909-1084) polskiego matematyka ze szkoły lwowskiej działającego w USA. W tym samym czasie również John van Neuman (1903-1957) pracujący w Princeton dostrzegł w nich uproszczony model fizyki rzeczywistego świata i poszukiwał z ich użyciem najprostszyc struktur zdolnych do samoreprodukcji. Model ten, znany dziś jako Automaty Komórkowe (*Cellular Automata*), zawierają dyskretne modele składające się z układów komórek, a każdy z nich może być w jednym z licznych możliwych skończonych stanów. Każda komórka jest uaktualniana synchronicznie, zgodnie z lokalną interakcją wynikającą z zasady przyjętej dla określenia stanu komórek sąsiednich⁷. Na początku lat 80. ubiegłego wieku Automaty Komórkowe stały się także narzędziem fizyków pomocnym przy badaniu systemów o dużej złożoności. Ich popularyzatorem był przede wszystkim Stephen Wolfram (ur.1959), znany jako twórca pakietu *Mathematica*. Próbował on także sklasyfikować Automaty Komórkowe. Gdyby ten zamiar się powiódł można by wtedy mówić o klasyfikacji wszystkich dyskretnych procesów dynamicznych. Jednak Wolfram podzielił rozważaną przez siebie grupę automatów na cztery klasy: homogeniczne, stabilne lub periodyczne, chaotyczne oraz mieszane.

⁵ Patrz: A. Lindenmayer, *Mathematical models for cellular interaction in development*, Journal of Theoretical Biology, No. 18, 1968.

⁶ Adaptacjogeneza jest procesem ciągłym powstawania wciąż nowych przystosowań w wyniku ewolucji. Adaptacja jest określana jako proces przystosowywania się osobników do warunków środowiskowych na podstawie modyfikacji ewolucyjnych.

⁷ Szczegółowy opis systemu programów automatyzacji komórkowej, patrz: Stephen Wolfram, *Universality and Complexity in Cellular Automata*, w: *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers*, Westview Press, Philadelphia 1995, 140–157.

Na automat komórkowy składa się struktura danych i algorytm, który na niej operuje. Struktura ta ma postać tablicy komórek pewnego typu. Może to być tablica o dowolnej liczbie wymiarów - od jednowymiarowego wektora, poprzez macierz dwuwymiarową aż po tablice trój- i więcej wymiarowe. Najczęściej stosowane są znane algorytmy takie jak „gra w życie oraz „mrówka Langtona.

Architekci wykorzystują *Cellular Automata* z powodu możliwości generowania różnorodnych wzorów geometrycznych. System ten znajduje szerokie zastosowanie; od ornamentyki do automatycznego wolumetrycznego generowania budowli. Ingeborg M. Rocker, stosując *Cellular Automata*, generuje formy w skali budowlanej, Michael Batty zaś wykorzystuje je do projektowania w skali urbanistycznej. Natomiast Mike Silver przedstawił projekt konkursowy San Jose State University Museum of Art and Design (2003), w którym automatyzowanie komórkowe zostało wykorzystane w szerszym niż dotąd zakresie⁸.

Fraktale

Geometria fraktalna została sformułowana i sformalizowana w końcu lat 70. XX w. przez Benoit Mandelbrota (ur.1924), matematyka polskiego pochodzenia. Jednak wcześniej Georg Cantor (1845–1918), Guiseppe Peano (1858–1932), David Hilbert (1870–1924), Helge van Koch (1862–1943), Wacław Sierpiński (1882–1969), Gaston Julia (1893–1978) i Felix Hausdorff (1868–1942) studiowali różnorakie aberracje matematyczne, które stały się dziś prekursorami geometrii fraktalnej.

Geometria euklidesowa nie opisuje obiektów świata realnego, takich jak drzewa, chmury, góry etc. Idealne utwory takie, jak prosta, okrąg, kwadrat, sześciąt itd. są wymyślonym przez ludzi uproszczeniem Natury. Krzywe zaś fraktalne składają się z nieskończonych elementów, które są nieskończenie małe i somopodobne i dlatego mogą opisywać to, co buduje Natura. Długość ich zwiększa się do nieskończoności w nieskończenie małej skali i dlatego nie jest możliwe określenie pozycji punktu krzywej fraktalnej za pomocą układu współrzędnych⁹.

Geometria fraktalna to obecnie żywo rozwijająca się dziedzina wiedzy. Zajmują się nią specjaliści różnych nauk: matematycy, fizycy, mechanicy, a także architekci i artyści. Fraktale znalazły także zastosowanie w komunikacji, przetwarzaniu danych, zapisywaniu informacji. Wielu badaczy twierdzi, że jest to geometria, jakiej używa Natura, budując swoje dzieła. W chmurach, liniach wybrzeży morskich, łańcuchach górskich, płatkach śniegu, drzewach, pianie mydlanej można odkryć kształty fraktali. Geometria ta daje dziś architektom możliwość ujmowania związków z naturą i kosmosem, jak również, manifestowania odejścia od koncepcji Newtona i Laplace’a.

Architekci postrzegają geometrię fraktalną jako integralną część czy oznacznik teorii chaosu i nauk o złożoności¹⁰. Jednak nie występuje zbyt wiele podobieństw między definicjami architektów i matematyków względem „architektury fraktalnej”. Architekci zignorowali poglądy matematyków odnośnie do środowiska zbudowanego, a matematycy przestali analizować prace architektów, którzy przywłaszczyli sobie i posługują się geometrią fraktalną. Chodzi im głównie o efekty formalne w poszukiwaniu nowych jakości estetycznych. Ukazują to, między innymi: Peter Eisenman (*Cannaregio*, Wenecja, 1978,) Steven Holl (*Simmons Hall*, MIT Cambridge, (1999–2002), Johnston Marklee, (*Helios House*, Los Angeles, 2007) czy ARM Ashton Raggart McDougal (*Storey Hall*, Melbourne (1995–1997)). Greg Lynn zaś w projekcie *Cardiff Bay Opera House* (1994) proces formowania oparł na organizacji fraktalnej.

Gramatyki kształtu

W 1971 George Stiny i James Gips przedstawili gramatyki kształtu (*Shape Grammars*). Był to pierwszy, skierowany do projektantów, system generatywny wytwarzający kształty geometryczne¹¹. Gramatyki kształtu wywodzą się z geometrii analitycznej, w której przez zastosowanie zapisu formalnego pojawiła się możliwość definiowania wszelkiego rodzaju obiektów (także nie geometrycznych)

⁸ Patrz: Mark Silver, *Automason*, AD, Vol. 76, 2006, 46–51.

⁹ Więcej o geometrii fraktalnej, patrz: Jacek Kudrewicz, *Fraktale i chaos*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.

¹⁰ Więcej o związkach architektury z geometrią fraktalną patrz: Michael J. Ostwald, *Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry*, Nexus Network Journal, Architecture and Mathematics, Vol. 3, No. 1 (Winter–Spring 2001), 73–84; także: Michael J. Ostwald, *Fractal Traces: Geometry and the Architecture of Ushida Findlay*, w: Leon van Schaik (red.), *Ushida Findlay*, Barcelona: 2G, 1998, 136–143.

¹¹ Patrz: William J. Mitchell, *The Logic of Architecture*. MIT Press, London, 1990; także: George Stiny, *Shape: Talking about Seeing and Doing*. MIT Press, Cambridge, MA 2006.

oraz ich transformacji. Gramatyki kształtu są przykładem systemów generatywnych opartych na modelu lingwistycznym i stąd wzięła się ich taka nazwa. Gramatyki kształtu zdefiniowano w analogii do gramatyki formalnej. Dzięki temu możliwe jest za pomocą reguł określanie procesu generowania wyrażonych graficznie słów języka zbudowanego z alfabetu złożonego z symboli.

System przetwarzający gramatykę operuje w tzw. przestrzeni projektowej wyznaczając zbiór potencjalnych rozwiązań projektowych. System ten opiera się na metodzie, która wedle ustalonych zasad generuje formę przez rozpoznawanie kształtu i zmian w jego położeniu. W skład systemu wchodzi zbiory zasad, które rekursywnie inicjują kształty. Zasady te określają transformację przestrzenną i pozwalają na przesunięcia, dobór skali, obracanie etc. każdego kształtu, tak aby stał się częścią innego. Przez skończoną liczbę zasad gramatyki kształtu generują nieskończoną ilość kształtów geometrycznych.

Wyróżniającą cechą tego systemu jest to, że zasady mogą być rozpoznawane i stosowane do wyznajdowania kształtów w sposób, który nie został wcześniej zredefiniowany w tych gramatykach. System ten można także stosować jako narzędzie do analiz, dekompozycji złożonych kształtów i prostych całości oraz jako narzędzie do syntezy, generowania skomplikowanych form z prostych elementów geometrycznych. W *Experience Music Project* w Seattle (1997–2000) zespół Gehry Partners użył *Shape Grammars*, aby zrationalizować zakrzywione powierzchnie. Gramatyki zostały tak skonstruowane, aby algorytm mógł być, w różny sposób, modyfikowany, by wykonać nieregularne tesselacje powierzchni zakrzywionej.

Algorytmy genetyczne

Podstawowy algorytm genetyczny został opracowany w 1975 przez Johna H. Hollanda (University of Michigan) w języku programowania FORTRAN i rozwinięty dzięki jego pracom z lat 60. i 70. XX w. Działa on tak: w zdefiniowanym środowisku inicjuje się (najczęściej losowo) pewną początkową populację osobników i poddaje ocenie. Każdemu z nich trzeba przypisać zbiór informacji stanowiący jego genotyp, który daje podstawę do utworzenia fenotypu¹². Fenotyp jest zbiorem cech, jakie podlegają ocenie przez funkcję przystosowania, która modeluje przyjęte środowisko. Czyli genotyp opisuje rozwiązanie problemu, a fenotyp (funkcja przystosowania) ocenia, jak dobre jest to rozwiązanie. Populacja inicjująca poddawana jest ocenie (selekcji) po to, aby najlepiej dostosowane osobniki wzięły udział w reprodukcji. Tylko genotypy poddawane są procesom ewolucyjnym i są kojarzone przez krzyżowanie z genotypami rodziców i podlegają mutacji (wprowadzane są niewielkie zmiany losowe). Powstaje nowe pokolenie, które po ocenie stanie się bazą dla kolejnego kroku algorytmu. Algorytm powraca do kroku drugiego, jeżeli nie znaleziono dostatecznie dobrego rozwiązania. W przeciwnym wypadku uzyskuje się wynik.

Ewolucyjne techniki obliczeniowe były już znane w dziedzinach, w których chodziło o optymalizację, przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań alternatywnych dla najlepszych rozwiązań. Połączenie algorytmu generatywnego z algorytmem ewolucyjnym sprawia, że programy takie stały się atrakcyjnym narzędziem projektowym dla architektów. Dostarczają one narzędzi do generowania oryginalnych form, jak to czynią np. Zaha Hadid Architects.

Algorytmy genetyczne odgrywają także istotną rolę, zwłaszcza w projektowaniu architektury wrażliwej na środowisko. Ukazują to prace, między innymi Emergence and Design Group, Foreign Office Architects (FOA), OCEAN NORTH, Scheffier + Partners Architects. Popularyzacja tych narzędzi wynika w ze wzrostu informacji potrzebnych w projektowaniu większości złożonych obiektów, co często przewyższa zdolność pojmowania i przewidywania.

Systemy naturalne przedstawiają bowiem duży poziom integracji i funkcjonalności przez dynamiczne sprzężenie zwrotne ze środowiskiem swojego życia. Formy wyłaniające się w procesach naturalnych najlepiej dostosowują się do środowiska i są najbardziej wydajne pod względem materiałowym, funkcjonalnym, energetycznym.

Ewolucyjny rozwój i wymiana między strukturą biologiczną a środowiskiem zachęcają do uczy-nienia z tych procesów narzędzi służących projektowaniu ekofektywnych sztucznych form, odpowiadających potrzebom użytkowym. Instrumentalizacja procesów naturalnych otwiera dla architektury nowe terytoria do eksploracji konceptualnych, formalnych i tektonicznych. Uwaga koncentruje się zatem na formach, które wyłaniają się z procesów informatycznych, a nie tylko intelektualnych.

¹² Genotyp składa się z chromosomów, gdzie zakodowany jest fenotyp i ewentualnie pewne informacje pomocnicze dla algorytmu genetycznego, natomiast chromosom składa się z genów.

Architekci, mając dziś do wyboru bogaty zestaw narzędzi cyfrowych wykorzystują logikę ich działania zgodnie ze swoimi predyspozycjami twórczymi – od demiurga „dającego formę” do kontrolera procesów generatywnych, gdzie finalny wygląd nie jest wynikiem wyobraźni architekta, lecz zdolności generatywnych oprogramowania.

Rozróżnianie konceptualne między tradycyjnym tworzeniem formy (*form-making*) a wynajdowaniem formy (*form-finding*) leży dziś u podstaw podziału metodyki projektowania wspomaganego przez narzędzia cyfrowe. Narzędzia i systemy generatywne sprawiły, że wyobraźnia i wrażliwość architekta zostaje przesunięta w obszary przewidywań efektów danych procesów.

Architekci korzystający z generatywnego wzorca mogą być postrzegani jako kontrolerzy procesów, ułatwiają oni bowiem pojawianie się procesów generujących formę lub formację strukturalną.

Cyfrowa instrumentalizacja procesów zachodzących w przyrodzie, wraz z proponowanymi metodami i technikami, daje dziś możliwość zastosowania tych wzorców w projektowaniu architektoniczno-strukturalnym. Obecnie stanowi kluczową koncepcję istotną tak samo dla teorii, jak i metod projektowania cyfrowego.

Wymienione koncepcje oparte na procesach naturalnych można obecnie stosować w projektowaniu architektury z użyciem narzędzi programu *Genr 8*, a także za pomocą technik takich, jak:

– *Sensitivity Analysis Method* – obejmuje metody oparte na fizycznych modelach, jakie stosowali Gaudi, Heine Eisler i Frei, które są pomocne w definiowaniu kształtu powierzchni swobodnych. Geometria kształtu jest tu modyfikowana i analizowana w procesie iteratywnym. Cyfrowym rozwinięciem tych metod jest *Shape Design Method using Sensitivity Analysis*. Zawarte tam narzędzia pozwalają minimalizować energię powierzchniową struktur o swobodnie zakrzywionych powierzchniach.

Inną techniką dysponuje *3D Extended Evolutionary Structural Optimization*. Jest to rozszerzenie tradycyjnej metody *Evolutionary Structural Optimization* (ESO), która służyła tylko do generowania formy. Forma wynikała z mechanicznych zachowań, które jednocześnie odpowiadały modyfikacji jej kształtu. Nowa wersja tej metody pozwala generować racjonalne kształty strukturalne. Dzięki wprowadzeniu procesu ewolucyjnego, można generować trójwymiarowe struktury. Metoda analizy kształtu jest tu oparta na iteratywnym procesie, którego celem jest osiągnięcie optymalnych rozwiązań strukturalnych. Rozwiązania te dostosować można do ograniczeń, jakie narzuca koncepcja architektoniczna. Komputacji używa się tu tylko do obliczeń zgodności formy strukturalnej z naprężeniami i deformacją. Ocena jest interpretowana przez wprowadzenie interaktywnej metody analitycznej, która opiera się na topologii, a nie samej geometrii. Podobnie jak w *Genr8*, forma wynikowa zachowuje te same relacje topologiczne. Metoda ta jest pomocna w dostosowaniu ewolucyjnego potencjału adeptycyjnego do danego projektu.

Cyfrowe procesy oparte na modelach biologicznych to propozycja, która pokazuje, jak badać tektonikę modeli cyfrowych. Na przykład wiedza o tektonicznych strukturach materiałowych daje możliwość kontroli procesu ewolucyjnej adaptacji. Ponadto proces ten może być prowadzony z uwzględnieniem danych dotyczących obciążeń i działania sił. Narzędzia te jednak nie są jeszcze doskonałe i mają ograniczone możliwości opracowywania tektoniki cyfrowej. Brak jeszcze wiedzy, jak zapewnić heterogeniczność i rozwój cyfrowych modeli opartych na procesach naturalnych. Nie jest wiadomo, jaki rodzaj inteligentnego systemu jest potrzebny, by wybierał właściwe strategie adaptacyjne, a także, jakie prerogatywy będzie miał człowiek–inżynier w interakcji z takim systemem.

Istotne pytania odnoszą się także do możliwości działania człowieka i maszyny jako jednego systemu generatywnego. Czy taki model morfogenetyczny przekroczyłby topologicznie uporządkowaną wiedzę o tektonice? Dziś są to rozważania tylko teoretyczne, choć technologicznie możliwe. Jednakże informują, jakie są oczekiwania skierowane do projektowania cyfrowego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Buckminster R. Fuller *Synergetics, Explorations In geometry of Thinking*, Macmillan Publishing Co. Inc., 1975, 1979.
- [2] Jacek Kudrewicz, *Fraktale i chaos*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [3] Aristid Lindenmayer, *Mathematical models for cellular interaction in development*, Journal of Theoretical Biology, No. 18, 1968.
- [4] Stanisław Latour, Adam M. Szymiski, *Projektowanie systemowe w architekturze*, PWN, Warszawa–Poznań, 1982.
- [5] William J. Mitchell, *The Logic of Architecture*. MIT Press, London, 1990,
- [6] Michael J. Ostwald, *Fractal Architecture: Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry*, Nexus Network Journal, Architecture and Mathematics, Vol. 3, No. 1 (Winter–Spring 2001), 73–84.

- [7] Michael J. Ostwald, *Fractal Traces: Geometry and the Architecture of Ushida Findlay*, w: Leon van Schaik (red.), *Ushida Findlay*, Barcelona: 2G, 1998, 136–143.
- [8] Adam M. Szymiski, *Twórczość architektoniczna. Wstęp do teorii projektowania systemowego (elements of system designing theory)*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, nr. 101, Szczecin, 1997.
- [9] George Stiny, *Shape: Talking about Seeing and Doing*. MIT Press, Cambridge, MA 2006.
- [10] Stephen Wolfram, *Universality and Complexity in Cellular Automata*, w: *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers*, Westview Press, Philadelphia 1995, 140–157.
- [11] Yehuda E. Kalay, William J. Mitchell, *Architecture's New Media: Principles, Theories, And Methods of Computer-aided Design*, MIT Press, 2004.