

Fussil Design

Automaty komórkowe jako spoiwo między naturą a algorytmem



Strahinja Jovanović



recenzowany
material
konferencyjny

Ten artykuł jest oparty na prezentacji przedstawionej na C-IDEA Design Conference, która odbyła się w dniach 23–26 października 2025 na Shih Chien University, Kaohsiung Campus, Tajwan, Chiny.

#visual communication
#cellular automata
#morphogenetic design
#parametric design
#creative coding
#3D printed artefacts
#algorithm
#fussil

Streszczenie

Głównym tematem niniejszego opracowania jest badanie podstawowych elementów natury oraz automatów komórkowych i ich wpływu na procesy projektowe. Poprzez praktyczne eksperymenty i teoretyczne analizy różnych automatów komórkowych powstaje nowe narzędzie projektowe, które umożliwi projektowanie we współpracy z naturą oraz wdrażanie powstałych artefaktów w różnych dziedzinach projektowania. Nowe automaty komórkowe tworzone w tym procesie nazywane są fussels – od łacińskich słów fossus (wykopany) oraz futurus (przyszły, będący).

Podstawową zasadą tworzenia i oceny badań jest programowanie generatywne, które wykorzystuje również do prowadzenia eksperymentów oraz tworzenia narzędzi projektowych.

Wyniki badań oraz artefakty projektowe prezentowane są w środowiskach analogowych i cyfrowych. Prezentują szeroki zakres wzorów i form generowanych przy użyciu nowego narzędzia projektowego.

Poprzez łączenie natury i algorytmów dążę do stworzenia nowych systemów wizualnych oraz procesów projektowych. Procesy te stanowią kluczowy element w postrzeganiu natury jako czynnika kształtującego nowe praktyki projektowe oraz artefakty przyszłości.

1. Wprowadzenie

Narodziny. Egzystencja. Śmierć. Nagle wszystko, co nas otacza, staje się odzwierciedleniem natury, która towarzyszy nam, kształtuje nas i tworzy znane otoczenie – od prostych zjawisk po złożone pojęcia, które nazywamy życiem. Nasze relacje z naturą ukształtowały się na przestrzeni wieków współlistnienia i poszukiwania jej istoty.

Zainspirowani naturą, badamy zarówno makro-, jak i mikrokosmos, a także definiujemy naszą kulturę, tożsamość i projektowanie, korzystając z jej wzorców, form, zasobów i zachowań. Jednocześnie, będąc częścią natury, rozwinięliśmy własne konstrukty – liczby, litery, środki komunikacji oraz współczesne systemy cyfrowe.

Obecnie automatyzacja, przetwarzanie danych i sztuczna inteligencja stają się przedłużeniem naturalnej ewolucji, naśladując i przyspieszając jej mechanizmy. Systemy algorytmiczne, podobnie jak natura, opierają się na wzorcach interakcji, adaptacji i sprzężenia zwrotnego. Pojawia się zatem pytanie: jaki jest algorytm natury? I dalej – czy możemy projektować równoległe z nim, a nawet w jego ramach?

Ta subtelna granica jest trudna do uchwycenia, a jednak kluczowa dla projektowania przyszłości, która będzie bardziej świadoma i ewoluująca wraz z naszym otoczeniem. Niniejsze badania analizują te zagadnienia poprzez studiowanie automatów komórkowych – modeli obliczeniowych symulujących samoorganizujące się zachowania systemów żywych – i przekształcanie ich w narzędzia projektowe. Celem jest nie tylko przedstawienie natury za pomocą obliczeń, lecz także współprojektowanie z nią. Koncepcja współprojektowania przenosi punkt ciężkości z naśladowania na współpracę: projektant staje się facylitatorem procesów, a nie ich jedynym autorem.

Interdyscyplinarny charakter tej pracy obejmuje filozofię, biologię, matematykę i projektowanie. Koncepcje ewolucji darwinowskiej, morfogenezy Alana Turinga oraz Gry życia Johna Conwaya są reinterpretowane za pomocą kreatywnego programowania, aby zbadać wspólną logikę wzrostu i adaptacji. Każdy eksperyment wizualizowany jest zarówno cyfrowo, jak i fizycznie, podkreślając, że myślenie projektowe i myślenie biologiczne nie są przeciwieństwami. To równoległe systemy, które poszukują formy i spójności.

Zamiast traktować algorytmy jako abstrakcyjny kod, praca przekłada je na doświadczenia

wizualne i dotykowe. Każdy algorytm staje się żywym szkicem – organizmem zdolnym do zmiany, reagowania i współistnienia w swoim środowisku. Kulminacją tych badań jest stworzenie Fussil Design Tool – platformy pozwalającej projektantom interaktywnie generować i manipulować ewoluującymi wzorami, łącząc świat cyfrowy ze środowiskiem naturalnym.

Proces badawczy prowadzi od refleksji filozoficznej do praktycznych zastosowań, łącząc teorię, obliczenia i projektowanie. Rozpoczyna się od traktowania natury jako inteligentnego projektanta i eksplorowania analogii między ewolucją biologiczną a logiką algorytmiczną. Następnie realizowane są eksperymenty wizualne i obliczeniowe, które przekładają te idee na systemy generatywne, tworząc podstawę podejścia Fussil Design. W dalszej części prezentowane jest samo narzędzie Fussil Design Tool, pokazując jego zastosowanie jako kreatywnego instrumentu umożliwiającego współpracę projektantów z ewoluującymi organizmami cyfrowymi. Na zakończenie przedstawiono refleksję nad szerszymi implikacjami współprojektowania z naturą – ponownym przemysleniem twórczości, kreatywności i przyszłości praktyki projektowej.

2. Natura jako inteligentny projektant

2.1. Artefakt jako żywy organizm?

Aby zrozumieć, w jaki sposób natura i algorytmy mogą być ze sobą powiązane, pierwszym krokiem jest zbadanie systemów tworzonych przez samą naturę – organizmów żywych. Analizując ich strukturę, procesy reprodukcji i ewolucję, możemy dostrzec logikę leżącą u podstaw ich powstawania. Organizmy te pełnią rolę eksperymentów projektowych natury, ucieleśniając zasady adaptacyjnej skuteczności, przystosowania i samoorganizacji. Ich obserwacja pozwala zauważyć podobieństwa między formami naturalnymi a konstrukcjami algorytmicznymi. Daje to pierwszy wgląd w to, jak projekt może powstać bez świadomego udziału projektanta.

Pomarańcza, poza tym że jest nam dobrze znanym owocem, stanowi przykład natury jako zaawansowanego systemu projektowego [1]. Według różnych źródeł pojawiła się w Europie między IX a X wiekiem – prawdopodobnie za pośrednictwem Maurów lub poprzez rolnictwo sycylijskie. Już w tym okresie odnotowano istnienie złożonych systemów nawadniających przeznaczonych do jej uprawy.

Jeśli przyjrzymy się owocowi bliżej, zobaczymy, że jest to prawdziwy „pakiet projektowy”. Jego skórka chroni zawartość nawet przy upadku. Po otwarciu błona jest miękka i zawiera słodką, płynną substancję, dostarczającą energii i witamin. W środku znajduje się także niewielki pakiet niezbędnych składników do powstania kolejnej pomarańczy – nasiona, czyli zasób, który może rozwijać się w nieskończoność, o ile spełnione są odpowiednie warunki. To jeden z najbardziej zaawansowanych systemów projektowych natury, rozwijany przez ponad 3,8 miliarda lat – system samodzielnej reprodukcji.

Ten naturalny projekt można porównać do ludzkiego aktu projektowania: celowej kompozycji, optymalizacji materiałów i osiągania zamierzonego celu. Przez wieki ludzie selektywnie hodowali rośliny i zwierzęta, modyfikując ich genetykę w sposób przypominający procesy projektowania przemysłowego. W tym kontekście pomarańcza jest zarówno organizmem, jak i artefaktem – produktem ewolucji natury, który jednocześnie został ukształtowany przez interwencję człowieka.

Biolog Tim Lewens uchwycił tę dwoistość, zauważając, że biologia „znajduje się w dziwnej sytuacji, w której używa słownictwa projektowania, nie uznając inteligentnego projektanta” [3]. W tym świetle naturalna ewolucja funkcjonuje jako ciągły proces badań i rozwoju – system prototypowania, testowania i udoskonalania, podobny do pracy projektantów.

Można zatem powiedzieć, że pomarańcza jest artefaktem żywej natury – wynikiem niezliczonych iteracji naturalnego projektowania.

2.2. Nieintencjonalny umysł

Jeśli organizmy zachowują się jak zaprojektowane obiekty, to kto – lub co – jest ich projektantem? Odpowiedź na te pytania nie wymaga odwołania do boskiej inteligencji, lecz do samego procesu. W celu jej uchwycenia warto rozważyć cztery przyczyny Arystotelesa, które mogą również porządkować dalsze kierunki badań.

- **Przyczyna materialna: Z czego jest zrobione?**
- **Przyczyna formalna: Jak jest zbudowane lub ukształtowane?**
- **Przyczyna sprawcza: Skąd pochodzi?**
- **Przyczyna celowa: Do czego służy?**

Zastosowane zarówno do artefaktów, jak i organizmów, przyczyny te pomagają opisać nie tylko to, czym coś jest, ale także dlaczego istnieje. Ramy te stanowią podstawę do zbadania, w jaki sposób projekt – czy to ludzki, czy naturalny – wyłania się z konieczności, kontekstu i procesów adaptacyjnych. W odniesieniu do tej idei Darwin podkreślał mechanizmy ewolucyjne, które dziś interpretujemy jako procesy o charakterze algorytmicznym.

2.3. Niebezpieczna koncepcja Darwina

Rewolucja Darwina i jego radykalna koncepcja zmieniły sposób, w jaki postrzegamy świat żywych organizmów. Jego główna idea, skupiona głównie na dwóch podstawowych czynnikach adaptacji i różnorodności, została opisana w jego dziele O pochodzeniu gatunków. Podobnie jak w przypadku rozumowania empirycznego, Darwin przyjmuje świat takim, jakim jest i powoli odkrywa wszystkie mechanizmy przeszłości i przyszłości. Dlatego też jego twierdzenie ma na celu udowodnienie, że gatunki ewoluują, a z drugiej strony, w jaki sposób procesy te przebiegają.

Zmiany ewolucyjne są napędzane przez presję selekcyjną. Klasycznym przykładem jest ograniczenie zasobów, gdy wielkość populacji przekracza pojemność środowiska, co prowadzi do konkurencji między organizmami. Ten moment „krytyczny” [4] można rozumieć jako sytuację selekcyjną, w której Darwin sformułował dwa zasadnicze argumenty.

1. Jeśli nie ma różnic między populacjami, pozostają one w równowadze.
2. Jeżeli w populacji istnieje znacząca różnorodność, cechy dające przewagę niektórym jednostkom mogą zmienić strukturę populacji.

Cech tych można doszukać się w bardzo małej skali, a nawet najmniejsza zmiana może mieć znaczenie. Ponadto,

jeśli istnieje silna zasada dziedziczenia, zgodnie z którą populacja jest bardziej podobna do swoich rodziców niż do ich rówieśników, może to również prowadzić do powstawania cech, które z czasem ulegają wzmocnieniu.

Proces ewolucji poprzez dobór naturalny [5] będzie kształtował przyszłe stulecia wszystkich nauk. Prosta zasada przetrwania rodzi jednak pytanie o skalę zjawiska. Jeśli dobór naturalny zachodzi w ten sposób, jakie są najmniejsze elementy jego działania?

2.4. Natura i algorytmy

Argumenty przedstawione przez Darwina opierają się na dwóch rodzajach dowodów: logicznych i empirycznych. Jego teoria ewolucji sugeruje, że projekt może powstać bez świadomego projektanta. Zamiast tego projekt wyłania się w wyniku reprodukcji, zmienności oraz doboru naturalnego.

Niemniej jednak David Dennett pod koniec XX wieku nadaje tym operacjom logicznym termin, który najlepiej pasuje do wyjaśnienia Darwina, nazywając je algorytmami.

„Algorytmy nie są nowością i nie były nią również w czasach Darwina...

Stosunkowo nowym zjawiskiem – pozwalającym nam na cenną retrospekcję odkrycia Darwina są teoretyczne rozważania matematyków i logików na temat natury i mocy algorytmów” [4].

Refleksja Dennetta na temat Darwina doprowadziła do krytycznego sprostowania: ewolucja ma charakter algorytmiczny. Algorytm – procedura krok po kroku służąca do rozwiązywania problemów – nie wymaga inteligencji, aby stworzyć inteligentne wyniki. Aby proces można było uznać za algorytm, musi on posiadać trzy kluczowe cechy:

1. **Neutralność względem nośnika (substratu):** ta sama logika może działać na dowolnym podłożu – cyfrowym lub organicznym.



2. Bezmyślność

(brak intencjonalności):

proces nie rozumie własnych rezultatów; po prostu podąża za regulami.

3. Gwarantowana skuteczność: przy spełnieniu tych samych warunków algorytm niezawodnie prowadzi do tego samego typu rezultatu.

Cechy te definiują zarówno naturalną ewolucję, jak i procesy obliczeniowe. W ten sposób algorytmy stają się sobowtórami natury – jej abstrakcyjnym odbiciem w systemach stworzonych przez człowieka. Coś czysto mechanicznego może wytworzyć coś pozornie inteligentnego, tak jak losowe mutacje tworzą życie.

Czysto bezmyślne i mechaniczne kroki algorytmu mają zatem charakter w pełni automatyczny. Z definicji mogą one zachodzić wyłącznie jako „funkcjonowanie automatu” [4].

2.5. Natura – projekt bez projektanta

W przypadku automatów ewolucja jest wyzwalana przez przełączniki „włącz/wyłącz”, które generują kolejne wersje samych siebie. Jeśli jednak natura działa w oparciu o procesy algorytmiczne, wówczas każdy organizm jest jednocześnie produktem i producentem projektu. Z tej perspektywy ludzie nie znajdują się poza naturą, lecz są aktywnymi uczestnikami jej algorytmicznego rozwoju.

Filozof David Hume posłużył się przykładem zegarka: sterta części zegarka nie może sama złożyć się w działający mechanizm – potrzebny jest projektant. Kim więc jest projektant w naturze?

Projektant-człowiek, tworząc zegarek, poświęca swój czas i energię, aby najpierw zbadać problem. Od pytań ontologicznych, przez historyczne i funkcjonalne, aż po estetyczne – projektanci, opierając się na badaniach, opracowują koncepcję produktu i wytwarzają zaprojektowany obiekt. Ten proces badań i rozwoju, który stosujemy wobec przedmiotów tworzonych przez człowieka, stanowi analogię dla sposobu, w jaki powstają wszystkie organizmy.

Każda najmniejsza adaptacja w organizmie – każda zmiana zachodząca na przestrzeni milionów lat – jest formą naturalnych badań i rozwoju. Charles Darwin zauważył, że w ten sposób „projekt” pojawia się w naturze nie w wyniku pojedynczego, celowego aktu, lecz poprzez powolne i okupione kosztem selekcyjnym nagromadzanie drobnych zmian. Zjawisko to znane jest jako zasada kumulatywnego powstawania projektu.

Nagromadzenia te wylaniają się początkowo w nieuporządkowanym środowisku, gdzie z podstawowych praw fizyki i losowości powstają proste algorytmy zdolne do budowania porządku. Natura jest ostatecznie grą „porządku z chaosem”, która wykorzystuje właśnie wyżej wymienioną zasadę.

Wszystko to sugeruje, że życie nie powstało w wyniku jednorazowego, prostego procesu. Zależy ono od bardzo specyficznych praw i stałych definiujących nasz wszechświat. Być może żyjemy w rzadkim, sprzyjającym momencie kosmosu – w „strefie Goldilocks”, gdzie panują odpowiednie warunki, by przekształcić losowość w złożone formy życia. A może jest to jedyny rodzaj życia, jaki potrafimy rozpoznać.

Aby zilustrować to złożone rozumienie natury, stworzyłem Kosmiczne szkło (Ryc. 1). Obiekt ten reprezentuje nasz wszechświat i zawiera wszystkie niezbędne „składniki” – od prostych zasad rządzących automatami po ewolucję życia.

3. Algorytm ewolucyjny – sobowtór natury

Idea spójności między naturą a algorytmami była przedmiotem doświadczeń w XX wieku, mających na celu lepsze zrozumienie natury i jej procesów ewolucyjnych. Próbuąc uchwycić te procesy w formie matematycznej, Alan Turing zaproponował równanie, które pozwala uzyskać wgląd w kluczową wiedzę na temat struktur naturalnych. Czterdzieści lat później na to samo pytanie, lecz z innej perspektywy, odpowiedział John Horton Conway. Badając, w jaki sposób ewolucja i samoorganizacja mogą być wyrażone za pomocą algorytmów, możliwe staje się ponowne zinterpretowanie biologicznej kreatywności jako metodologii projektowania.

Aby wizualnie przedstawić sposób działania tych algorytmów, posłużę się prostym modelem zwanym automatem komórkowym. Najprościej rzecz ujmując, automat komórkowy to model matematyczny służący do symulacji złożonych systemów poprzez proste interakcje oparte na regułach. Składa się on z siatki pojedynczych komórek, z których każda podlega zestawowi podstawowych zasad określających, jak zmienia się w czasie.

Choć każda komórka zachowuje się niezależnie, ich zbiorowe zachowanie tworzy skomplikowane i często zaskakująco realistyczne wzory. Zasada ta – zgodnie z którą proste reguły lokalne generują globalną złożoność – stanowi podstawę

projektowania generatywnego i tworzy pomost między ewolucją naturalną a algorytmiczną.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzane są doświadczenia wizualne oparte na empirycznych scenariuszach automatów komórkowych. Są one programowane w języku JavaScript z wykorzystaniem biblioteki p5.js oraz biblioteki wizualizacji danych d3.js. Oba narzędzia umożliwiają osiągnięcie większej złożoności oraz ujawnianie istniejących ograniczeń, co prowadzi do nowych odkryć.

3.1. Automaty komórkowe

Podstawowy mechanizm logiczny ewolucji został zbadany poprzez stworzenie gry Game of Life przez Johna Hortona Conwaya. Gra ta odzwierciedla kluczowe decyzje algorytmiczne, które ujawniają najważniejsze założenia automatów komórkowych [6]. Zbudowana jest na dwuwymiarowej płaszczyźnie pikseli, gdzie każdy piksel reprezentuje pojedynczą komórkę. Każda komórka w siatce może przyjmować jedną z dwóch wartości – włączoną lub wyłączoną – interpretowanych jako analogia życia lub śmierci. Zmiana jej kondycji wynika z interakcji z sąsiednimi komórkami odbywającej się we wszystkich kierunkach.

Wyobraźmy sobie bezkresną siatkę złożoną z niewielkich komórek, z których każda może znajdować się w jednym z dwóch stanów: żywym albo martwym. W każdym kroku symulacji każda komórka analizuje swoich ośmiu najbliższych sąsiadów i stosuje się do następujących prostych reguł:

1. Jeśli żywa komórka ma mniej niż dwóch sąsiadów, umiera – co symbolizuje **izolację**
2. Jeśli żywa komórka ma dwóch lub trzech sąsiadów, przeżywa – co symbolizuje **stabilność**.
3. Jeśli martwa komórka ma dokładnie trzech sąsiadów, staje się żywa – co symbolizuje **reprodukcję**.

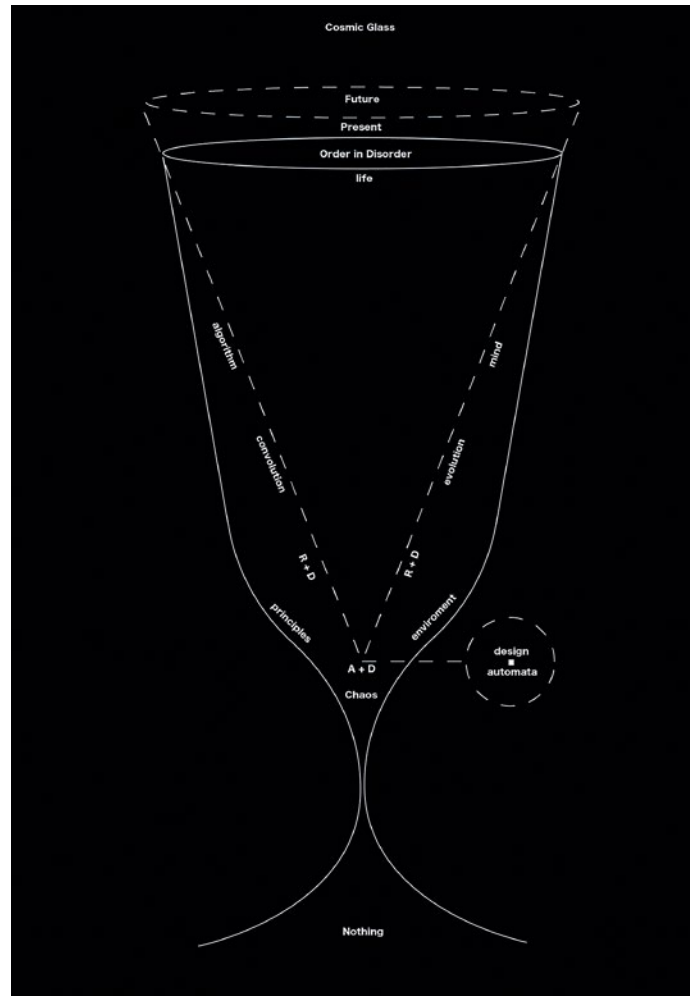
Te proste reguły wystarczają, aby generować ogromną różnorodność form, zachowań oraz warunków życia i ruchu.

Aby zobrazować te zjawiska, stworzyłem konfigurację, w której trzy komórki są ułożone w poziomej linii. Komórka środkowa pozostaje żywa, ponieważ ma dwóch sąsiadów. Natomiast komórki powyżej i poniżej zmieniają swój stan, gdyż każda z nich rozpoznaje tylko jednego żywego sąsiada. Konfiguracja ta wytwarza efekt migotania, naprzemiennie przechodząc od układu poziomego

do pionowego. *Flasher* (Ryc. 2a) stanowi przykład automatu komórkowego, który może trwać w nieskończoność, o ile nie zostanie zakłócony przez inne komórki.

Flasher należy do większej klasy automatów komórkowych zwanych oscylatorami. Oscylatory mogą różnić się wielkością oraz długością cyklu oscylacji.

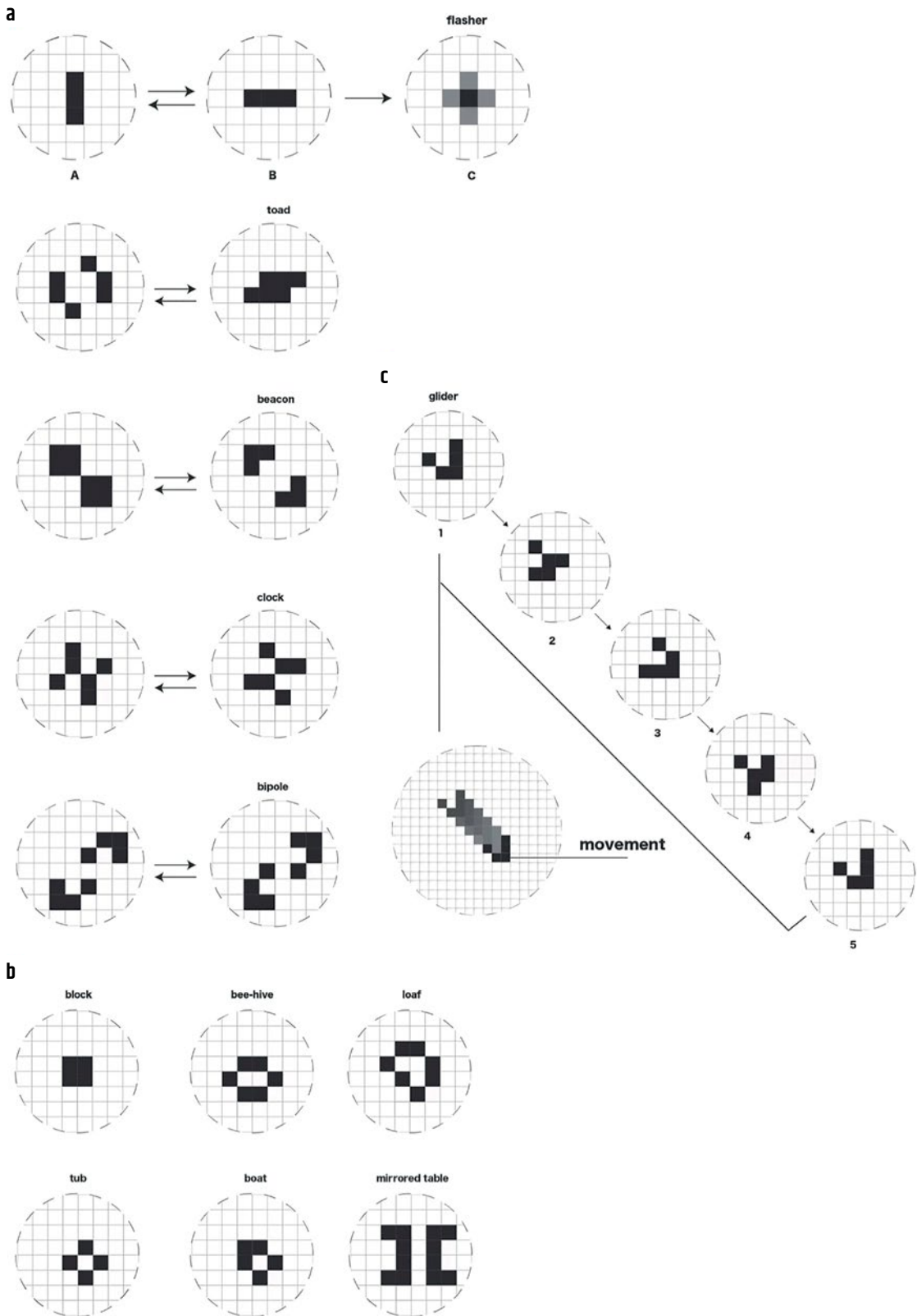
Niektóre automaty komórkowe generują struktury, które nie wykazują ruchu ani zmian. W ter-



Ryc. 1 Kosmiczne szkło, Infogrфика. Źródło: Opracowanie własne. Inspiracja: Teoria Wielkiego Wybuchu, David Dennet i Steven Hawking.

minologii Conwaya określane są one jako *still lifes* [6]. Są to struktury całkowicie stabilne – jeśli nie zostaną zakłócone, nie zmieniają kształtu ani położenia. Najprostszym przykładem takiego obiektu jest blok (*Block*, Ryc. 2b), złożony z czterech komórek ułożonych w kształt kwadratu.

Widzieliśmy, że te formy mogą być nieruchome, stabilne, ale również mogą być niestabilne.



Ryc. 2 John Horton Conway: Gra w życie – Reprezentacja różnych automatów komórkowych. Źródło: Opracowanie własne.

Jako formy niestabilne znajdują się w ciągłym ruchu, zmieniając swój kształt zgodnie z określoną siatką, aż do momentu zakończenia swojego istnienia lub kolizji z innym obiektem.

Zostały one odkryte na przestrzeni dekady w różnych wariantach i mogą być podzielone na dużą liczbę podkategorii. Najbardziej znaną wersją takiej formy jest *glider* (Ryc. 2). Wykonując pięć okresowych oscylacji, *glider* może przesunąć się o jeden piksel w określonym kierunku. Ruch tego automatu komórkowego jest wyjątkowy, ponieważ porusza się, analizując otoczenie w każdym kierunku, podobnie jak poruszałby się organizm ameboidalny. Interesujące w *gliderze* i jego podstawowej konfiguracji składającej się z pięciu komórek jest to, że niezależnie od kierunku ruchu, struktura ta odtwarza się w każdym kolejnym kroku symulacji, przesuając się jednocześnie w przestrzeni. Należąc do podkategorii struktur przemieszczających się (tzw. *spaceships*), *glider* jest najbardziej podstawowym przedstawicielem tej grupy.

Dowód na istnienie nieograniczonych wzorców, dzięki którym zaprojektowany obiekt może tworzyć własne struktury, był kluczowym punktem w zrozumieniu *Gry w życie*. Istnieją metody komunikacyjne, dzięki którym automaty komórkowe mogą wymieniać między sobą informacje, a tym samym generować nowe automaty komórkowe.

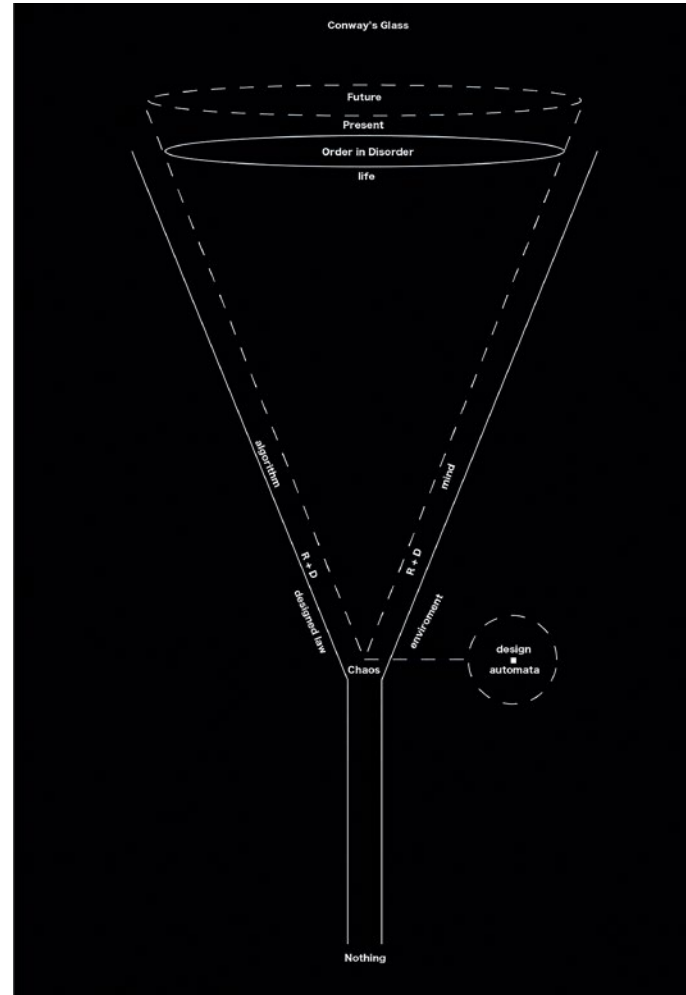
Dlaczego *Gra w życie* jest tak istotna? Ponieważ nie tylko ukazuje podobieństwa między naturą a algorytmami, ale także dlatego, że te systemy cyfrowe tego typu mogą tworzyć własne systemy obliczeniowe. W ten sposób *glider*, poruszając się w jednym kierunku, może stworzyć układy pełniące funkcję licznika sygnałów, które umożliwiają budowę bardziej złożonych bramek logicznych, takich jak AND, OR, NOT. Z kolei bramki te pozwalają konstruować złożone konfiguracje automatów komórkowych zdolne do autonomicznego realizowania procesów obliczeniowych.

Szklana struktura Conwaya (Ryc. 3) stanowi reprezentację tego, w jaki sposób ustalone reguły tworzą środowisko, w którym mogą wylaniać się podstawowe mechanizmy. System ten posiada własną dynamikę, potencjalną nieskończoność oraz element nieprzewidywalności.

3.2. Systemy reakcyjno-dyfuzyjne Turinga

Jeśli Conway zaproponował cyfrową logikę życia, Alan Turing dostarczył jej chemiczny odpowied-

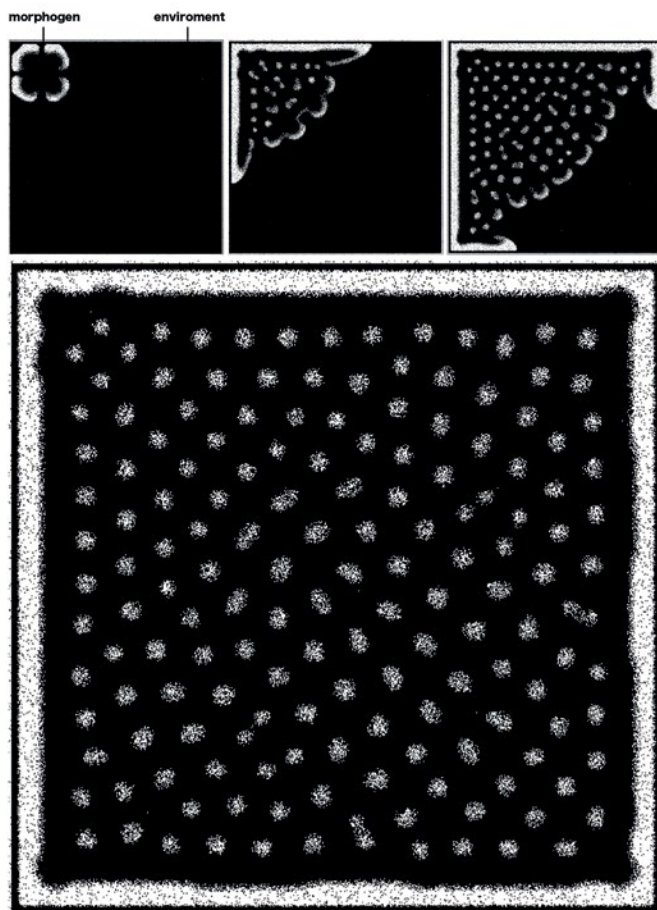
nik. W 1952 roku w artykule *The Chemical Basis of Morphogenesis* [7] Turing próbował wyjaśnić, w jaki sposób formy biologiczne – takie jak paski, plamy i spirale – powstają z pozornie jednolitych początków. Jego spostrzeżenie polegało na tym, że złożone struktury organiczne mogą wynikać z prostych interakcji chemicznych między dwiema lub więcej substancjami, które nazywał *morfo-genami*. W tym modelu *morfo-geny* pełnią funkcję elementów analogicznych do automatów komór-



Ryc. 3 Szklana struktura Conway'a.
Source: Źródło: Opracowanie własne.

kowych, wyrażających podstawowe reguły i ograniczenia systemu.

Zasada działania jest prosta: jeden morfo-gen pełni rolę aktywatora, stymulującego wzrost, podczas gdy drugi działa jako inhibitor, ograniczający go. Równowaga między tymi dwiema siłami – reakcją i dyfuzją – tworzy stabilne, ale skomplikowane wzory. Z biegiem czasu stężenia te organi-



Ryc. 4 System reakcji-dyfuzji Turinga.

Źródło: badanie własne. Eksperyment cyfrowy z użyciem p5.js

zują się w formy przypominające skóry zwierząt, rafy koralowe lub rozmieszczenie liści na lodydze.

Artykuł opisuje zarówno procesy mechaniczne, jak i chemiczne, które znajdują zastosowanie w różnych przypadkach. Należy jednak pamiętać, że teoria Turinga, zgodnie z tym, co napisał, działa w warunkach idealnych, które nie mogą być miarą rzeczywistej natury. Daje ona jednak bardzo podstawowe pojęcie o tym, w jaki sposób automaty komórkowe mogą reagować na otoczenie.

Widzimy tutaj, że Turing oceniał wszystkie warunki niezbędne do uzyskania dokładniejszych wyników: chemiczne i mechaniczne. Jest to również główna różnica w stosunku do automatów komórkowych Conwaya. Turing badał nie tylko podstawowe automaty, ale raczej ich ewolucję w czasie w relacji ze środowiskiem.

„W niniejszym artykule proponuje się zwrócić uwagę raczej na przypadki, w których aspekty mechaniczne można pominąć, a aspekt chemiczny jest najbardziej znaczący” [7].

Aby zilustrować działanie modelu Turinga, opracowałem zaprogramowane wizualizacje, które pozwalają lepiej zrozumieć jego założenia (Ryc. 4). Do modelowania reakcji w moich badaniach wykorzystałem model Gray-Scotta [8, 9] oparty na teorii Turinga. Tkanka w naszym przykładzie stanowi środowisko - siatkę komórek wypełniającą całą przestrzeń. Morfogeny znajdujące się w tym środowisku mogą występować w różnych stężeniach i reagować z nim.

Poprzez zróżnicowane stężenia automaty komórkowe pozostają w stałej interakcji ze środowiskiem, wykazując odmienne wzory w zależności od szybkości dyfuzji i reakcji.

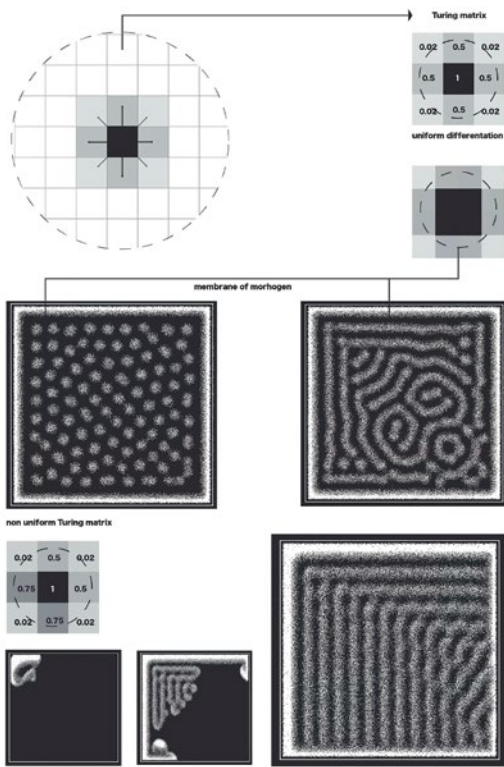
„Aby określić część tempa zmiany jednej z tych wielkości wynikającą z dyfuzji, w danym momencie wystarczy znać ilość tego samego morfogenu w komórce i jej sąsiadach” [7].

Tym samym Turing sugeruje, że jeśli mamy małe stężenie automatów komórkowych, to z biegiem czasu automaty te rozłożą się równomiernie w siatce, tworząc stabilny system.

W przeciwieństwie do Conwaya, który opiera się na zaprojektowanym zbiorze reguł, Turing buduje swoją teorię na równaniach matematycznych, umożliwiających stopniową akumulację formy w czasie. Nie mówimy więc o mechanicznych właściwościach komórki, lecz o jej głębszym poziomie – komunikacji ze środowiskiem.

Teoria reakcji-dyfuzji Turinga stała się przedmiotem długotrwałych badań po jego śmierci, dowodząc, że jej mechanizm nie tylko pozwala tworzyć wzory w naturze, ale także wyjaśnia, w jaki sposób tworzą się embriony i poszczególne części organizmów [10].

Przenosząc tę koncepcję na grunt projektowania obliczeniowego, możemy wyobrazić sobie cyfrowe płótno, w którym każdy piksel reprezentuje pojemnik z substancjami chemicznymi. W trakcie symulacji automaty komórkowe reagują, rozprzestrzeniają się i stabilizują, tworząc unikatowe formacje. Ostateczny wzór zależy od dwóch głównych parametrów:



Ryc. 5 Jednolite i niejednolite wzory Turinga.
 Źródło: badanie własne. Eksperyment cyfrowy z p5.js

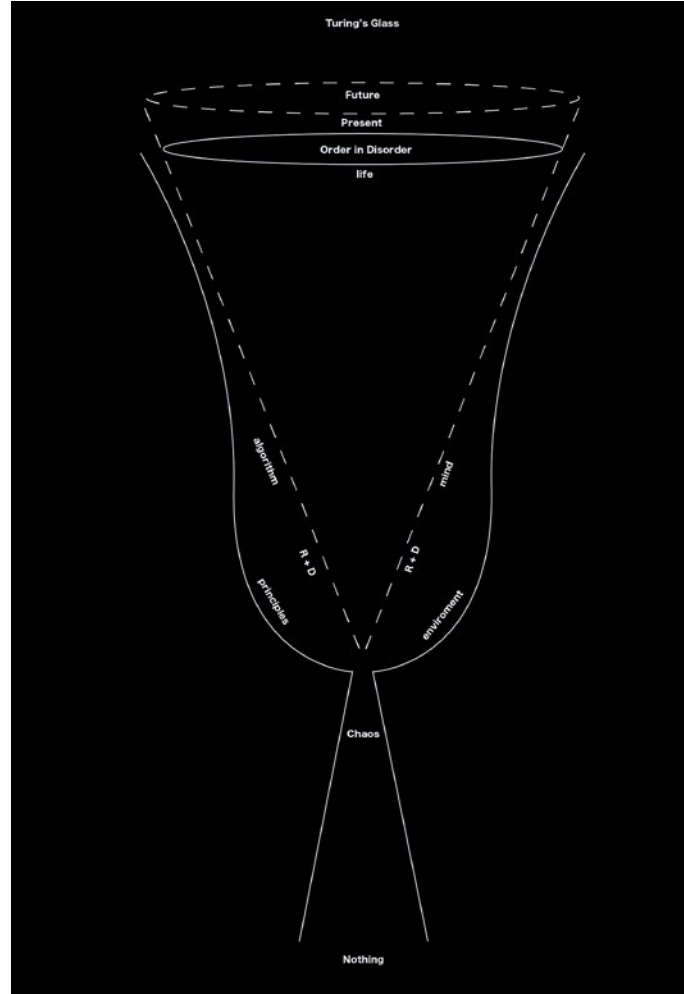
1. **Feed:** (współczynnik dopływu) – ilość nowych automatów komórkowych wprowadzanych do systemu.
2. **Kill:** (współczynnik zaniku) – szybkość usuwania istniejących automatów komórkowych.

Współczynniki Feed (dopływu) oraz Kill (zaniku) wynikają z reakcji zachodzącej w danym układzie [11]. W związku z tym nawet niewielkie różnice w wartościach tych parametrów prowadzą do powstawania zróżnicowanych struktur w systemie. Struktury te określane są mianem wzorów Turinga (Ryc. 5).

Z perspektywy projektowej system reakcji-dyfuzji oferuje nowe rozumienie sprawczości materiału. Zamiast narzucać formę, projektant tworzy warunki, w których forma samoorganizuje się. Przekształca to akt projektowania z działania polegającego na kontroli w działanie oparte na współpracy – współpracy z systemem, który posiada własną logikę i kreatywność [12].

Szkoło Turinga (Ryc. 6) tworzy kolejną przestrzeń [13] obserwacji, w której główny nacisk kła-

dzie się na gromadzenie właściwości niezbędnych do generowania różnorodnych wzorów. Wgląd Turinga nie ma zatem wyłącznie charakteru naukowego. Otwiera on nowy paradygmat estetyczny: formę rozumianą jako rezultat sprzężenia zwrotnego ze środowiskiem.



Ryc. 6 Szkoło Turinga. Źródło: Opracowanie własne.

4. Projektowanie morfogenetyczne

Niezależnie od tego, czy opisujemy automaty komórkowe Turinga, czy Conwaya, wszystkie one reprezentują algorytmy o zaprojektowanych prawach oraz zasadach akumulacji. Dla projektantów teorie te stanowią podstawę eksploracji na dwóch poziomach: po pierwsze, jako projektowanie samych praw algorytmicznych, a po drugie, jako projektowanie poprzez kontrolę rezultatów generowanych przez te algorytmy. Eksperymenty przedstawione w pierwszym i drugim rozdziale stanowią obecnie zasadniczy rdzeń badań eksploracyjnych.

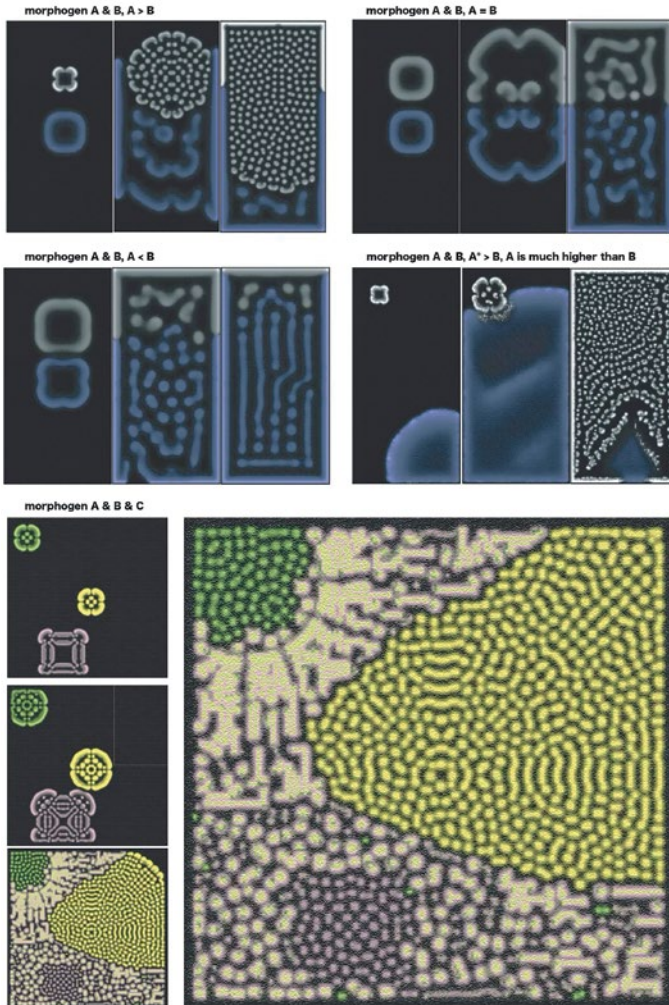
Systemy Turinga i Conwaya mogą wydawać się formalnie zbliżone, jednak ich podstawowe założenia są zasadniczo odmienne. Automaty Conwaya opierają się na zaprojektowanym prawie, które umożliwia im wykrywanie stanów sąsiednich komórek, a tym samym reagowanie na relacje pomiędzy elementami systemu. W tym sensie nie obserwują one samego środowiska jako takiego, lecz konfiguracje obiektów znajdujących się w jego obrębie. Z kolei modele Turinga obejmują mechanizmy reagowania na środowisko jako ciągle pole oddziaływań, generując stopniowo narastające wzory, lecz nie poprzez bezpośrednią interakcję z odrębnymi obiektami w przestrzeni.

Aby zbliżyć się do złożoności naturalnych ekosystemów, kolejnym krokiem jest umożliwienie współistnienia i wzajemnej interakcji wielu automatów. W celu stworzenia bardziej ogólnego mo-

delu automatu komórkowego, integrującego oba te podejścia, konieczne jest połączenie tych teorii w nową klasę systemów – określaną tutaj mianem „algorytmu morfogenetycznego”.

W 2005 roku Jamie Davies zaproponował zestaw kluczowych pojęć służących do opisu algorytmów morfogenetycznych:

1. **Feedback** (Sprzężenie zwrotne) – ciągła wymiana informacji pomiędzy komórką a jej otoczeniem.
2. **Self-assembly** (Samomontaż) – spontaniczne formowanie struktur z początkowo nieuporządkowanych komponentów.
3. **Adaptive self-organization** (Adaptacyjna samoorganizacja) – zdolność systemu nie tylko do generowania wzorców, lecz także do ich modyfikowania w odpowiedzi na zmieniające się warunki środowiskowe.



Ryc. 7 Jednolite i niejednolite wzory Turinga.
Źródło: badanie własne. Eksperyment cyfrowy z p5.js

„Mechanizmy morfogenetyczne w biologii posiadają zazwyczaj dodatkową „warstwę”, która zapewnia ujemne sprzężenie zwrotne i dostosowuje procesy morfogenetyczne w celu ich optymalizacji pod kątem określonej funkcji” [14].

Algorytm morfogenetyczny można zatem rozumieć jako integrację powyższych mechanizmów, prowadzącą do powstania automatu komórkowego definiowanego przez sprzężenie zwrotne, samomontaż oraz adaptacyjną samoorganizację. Uwzględnienie wszystkich tych zasad powoduje istotny wzrost złożoności systemu. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów proponuję w tym miejscu nowy model unifikacji tych procesów.

4.1. System projektowania wieloautomatycznego

Zarówno w modelu Conwaya, jak i Turinga każdy automat działa w izolacji. Aby zbliżyć się do złożoności naturalnych ekosystemów, kolejnym krokiem jest umożliwienie współistnienia i interakcji wielu automatów. System projektowania wieloautomatycznego czerpie inspirację z reakcji chemicznej

Belousova-Żabotyńskiego, w której kilka substancji oscyluje pomiędzy stanami aktywacji i hamowania [15].

W implementacji cyfrowej system ten symuluje mikroskopijny świat konkurujących ze sobą organizmów. Każdy typ automatu komórkowego posiada własne właściwości dyfuzyjne i reakcyjne, a ich współdziałanie prowadzi do powstawania ewoluujących ekosystemów (Ryc. 7). W zależności od przyjętych parametrów zazwyczaj ujawniają się trzy możliwe scenariusze:

1. **Dominacja:** jeden automat rozmnaża się nadmiernie i eliminuje pozostałe.
2. **Równowaga:** wiele automatów współistnieje w stabilnej równowadze.
3. **Stagnacja:** nie zachodzą istotne interakcje, a system ulega stabilizacji

Stany te odpowiadają dynamice obserwowanej w naturalnych ekosystemach – wzrostowi, równowadze oraz stagnacji – i ilustrują, w jaki sposób projektowanie algorytmiczne może naśladować rozumowanie ekologiczne. System nie generuje jednego, stałego rezultatu, lecz spektrum możliwych światów. Każdy z nich reprezentuje odmienną konfigurację relacji i komunikacji pomiędzy cyfrowymi „gatunkami” automatów komórkowych.

W kontekście badań projektowych model ten stanowi ramy dla myślenia morfogenetycznego: projektowanie nie jest tu rozumiane jako tworzenie odosobnionych obiektów, lecz jako kultywowanie relacji zachodzących w obrębie systemu. Każdy automat komórkowy staje się uczestnikiem szerszej całości, natomiast rola projektanta przyjmuje charakter kuratorski – polega na definiowaniu warunków początkowych oraz obserwacji, w jaki sposób wyłania się i rozwija złożoność (Ryc. 7).

4.2. Membrana haptyczna

Natura postrzega otoczenie poprzez warstwy wrażliwości: skórę, korę drzewa, ścianę komórkową. W systemach komputerowych podobną funkcję można symulować za pomocą membrany haptycznej – strefy percepcji, która rozciąga się wokół każdego automatu komórkowego. Koncepcja ta rozszerza klasyczny model sąsiedztwa automatów komórkowych, wprowadzając zmienny promień odczuwania.

Zasada Conwaya opiera się na ośmiu pikselach otaczających określony automat komórkowy, jed-

nak, aby uzyskać większy promień oddziaływania, stosuje się jądro spłotu. Jądro to reprezentuje wzorzec wpływu dla każdego piksela wokół obserwowanej komórki.

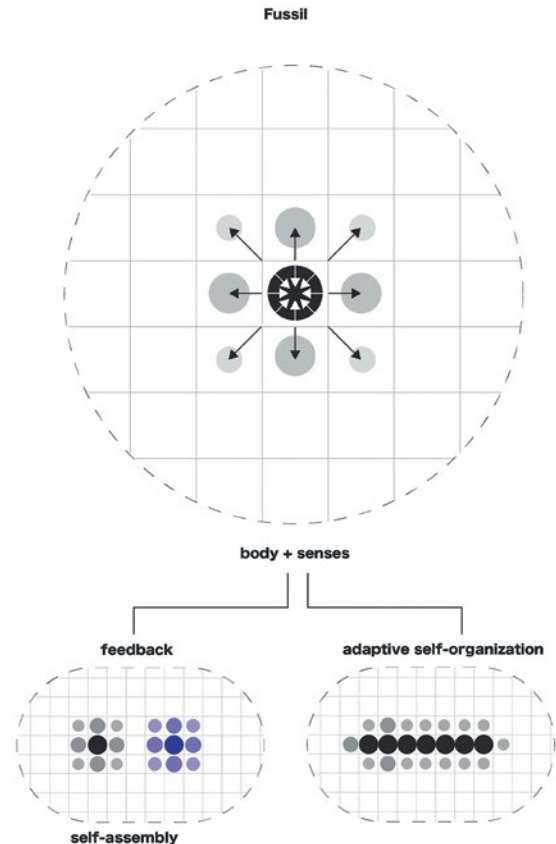
Poprzez kontrolę współczynnika skalowania tego jądra można stworzyć większe pole percepcji, co pozwala tworzyć nowe wersje Gry w Życie Conwaya, takie jak *Smooth Life* [16] czy *Lenia* [17].

Współczynnik skalowania określa, jak duży obszar wokół komórki należy uwzględnić, a następnie program wyznacza nowe stany.

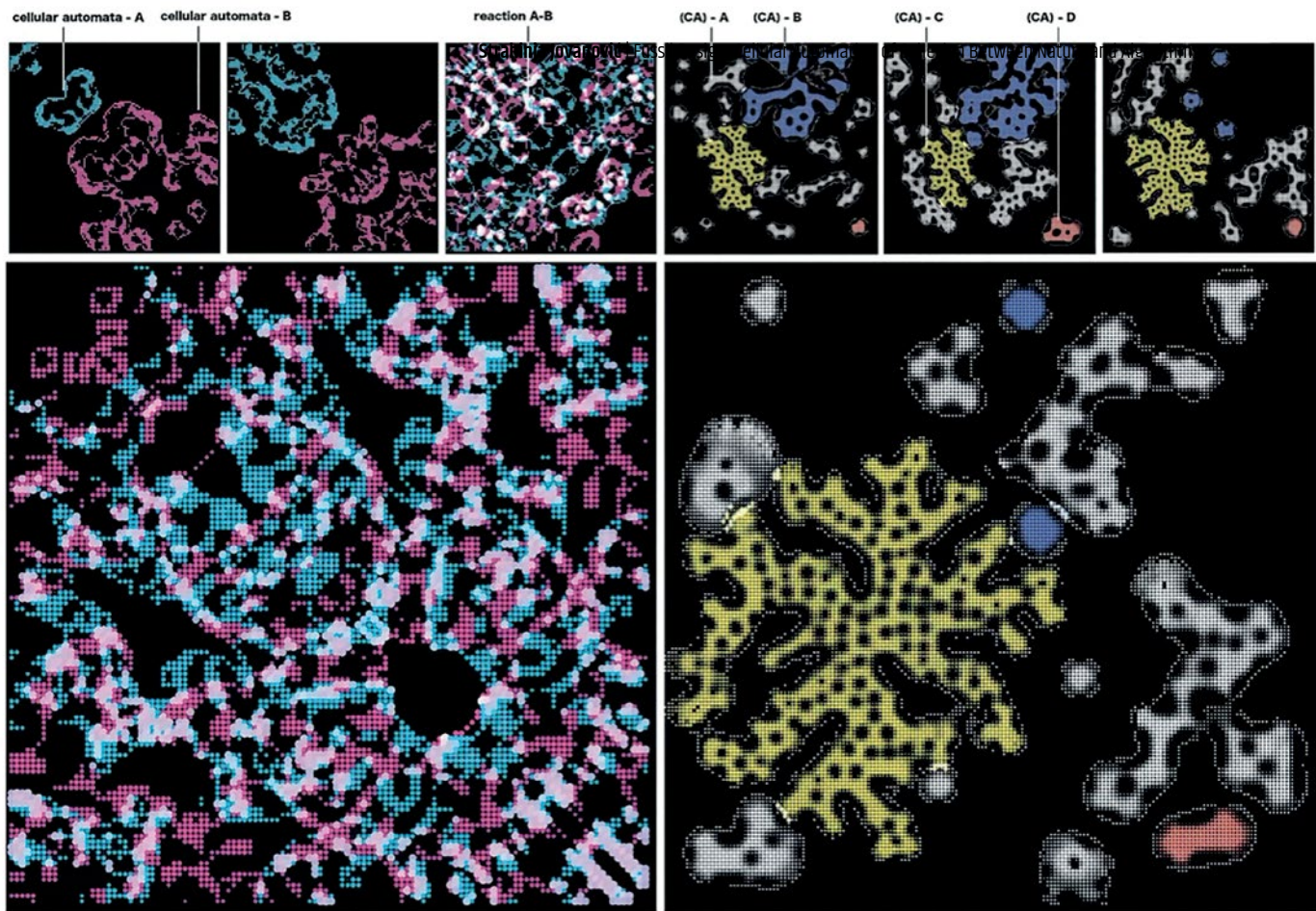
Nowa koncepcja została przedstawiona w następujący sposób:

1. Jeśli wartość gradientu jest wyższa od średniej, komórka przyjmuje nową wartość.
2. Jeśli gradient znajduje się w środkowym zakresie, jej stan jest określany przez poprzednią wartość.
3. Jeśli wartość gradientu jest niższa od średniej, komórka obumiera.

Membrana haptyczna przekształca siatkę ze sztywnej struktury w reaktywne środowisko. Każdy automat rozpoznaje gradienty zmian, do-



Ryc. 8 Diagram przedstawiający nowe automaty komórkowe. Źródło: Opracowanie własne. Fussils.



Ryc. 9 Eksperymenty ze zunifikowanymi automatami komórkowymi, wprowadzenie Fussils.
 Źródło: Opracowanie własne, eksperyment cyfrowy z p5.js.

stosowując swoje zachowanie do subtelnych różnic w otoczeniu.

Symulacja ewoluje w ten sposób w żywe pole cyfrowej materii – wrażliwe, reaktywne i samoorganizujące się (Ryc. 8).

Pojęcie to koresponduje z praktyką projektową. Podobnie jak rzemieślnik wyczuwa opór gliny lub napięcie tkaniny, membrana haptyczna pozwala algorytmowi wyczuwać i reagować na siły kontekstowe. Wprowadza element dotykowości do przestrzeni obliczeniowej – zamienia kod w materiał haptyczny.

5. Fussils

5.1. Fussils – czym tak naprawdę jest

Dzięki stworzeniu nowej membrany haptycznej i systemu projektowania wieloautomatycznego, niniejszy rozdział wprowadza badania w fazę zorientowaną na projektowanie. Przedstawiamy nowe automaty komórkowe, *Fussils*.

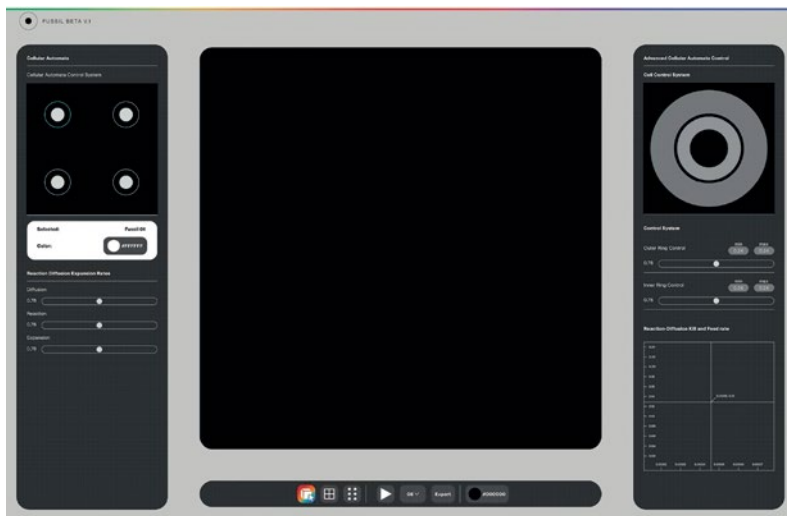
Automaty te zawierają wszystkie zasady, które Dennett opisywał jako mechanizm losowej zmienności, selekcji oraz kumulatywnego nara-

stania projektu, a także – zgodnie z teorią Daviesa – sprzężenie zwrotne, samomontaż i adaptacyjną samoorganizację

Aby wprowadzić *fussils* do środowiska, przeprowadziłem najpierw eksperymenty ze współczynnikami skali. Wynik jest teraz bardzo różny od innych stworzonych automatów, ponieważ można zaobserwować powstawanie bardziej złożonych organizmów. Każdy *fussil* nie jest jedynie elementem projektu, ale autonomicznym podmiotem, który zarówno kształtuje swoje otoczenie, jak i jest przez nie kształtowany.

Z perspektywy projektanta praca z *Fussils* przypomina kultywowanie cyfrowego ekosystemu. Zamiast szkicować lub modelować formę, ustawia się początkowe parametry – zasady przetrwania, wzrostu i wymiany – i obserwuje, jak ewoluują one w złożoność wizualną i strukturalną. Proces ten przypomina hodowlę koralu lub pielęgnację ogrodu: wyniki są kierowane, ale nigdy w pełni kontrolowane.

Fussils rozwijają się w czasie rzeczywistym, a ich struktury pulsują, dzielą się i łączą ponow-



Ryc. 10 Narzędzie projektowe Fussil.
 Źródło: Program cyfrowy z p5.js i d3.js



Ryc. 11 Narzędzie projektowe Fussil,
 przykład automatów komórkowych
 z haptyczną membraną. Źródło: Własne
 badanie, eksperyment cyfrowy z p5.js

nie. Niektóre osiągają stabilną formę, inne mutują w nieskończoność. Ta nieustanna dynamika stawania się oddaje istotę projektowania generatywnego. Odzwierciedla sposób działania natury – oparty na ciągłej iteracji i sprzężeniu zwrotnym.

Wizualnie Fussils mogą przypominać formę wirujące wiry, rozgałęzione żyły lub miękkie organiczne membrany. Każda konfiguracja odzwierciedla inną równowagę między porządkiem a chaosem, między przyciąganiem a odpychaniem. Projektant, obserwując te formy, zaczyna dostrzegać w nich cyfrowe echo naturalnej ewolucji – przypomnienie, że obliczenia również mogą być żywe.

5.2. Interfejs projektowania reakcji Fussils

Aby system był dostępny dla projektantów bez konieczności posiadania wiedzy programistycznej, interfejs projektowania reakcji Fussils został opracowany w bibliotekach p5.js i d3.js. Przekłada on złożoną matematykę reakcji dyfuzji i au-

tomatów na środowisko wizualne i interaktywne (Ryc. 10).

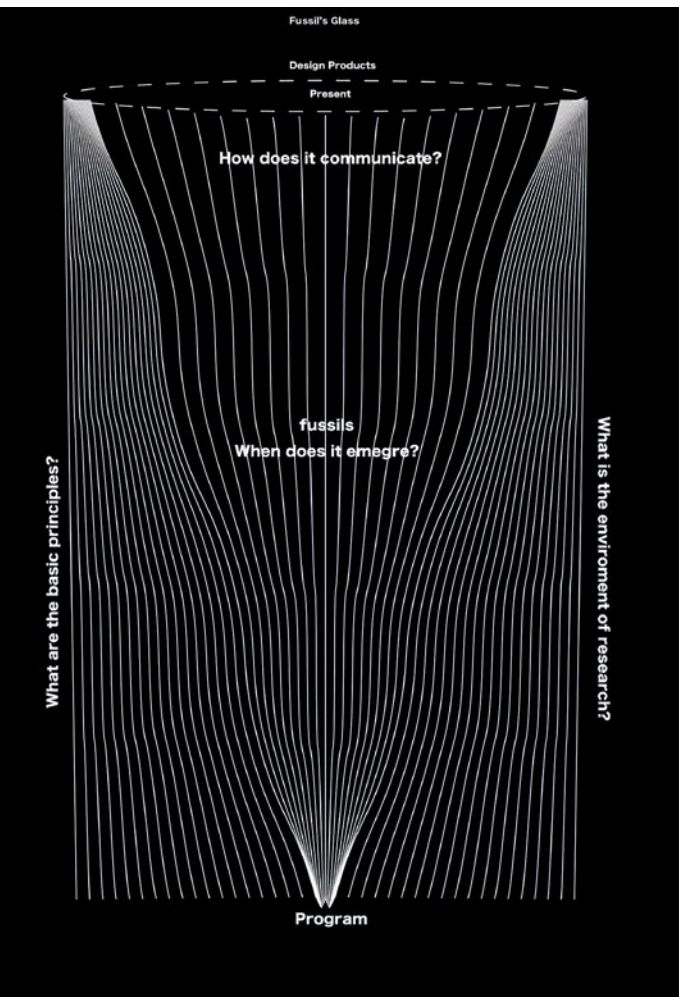
W przedstawionym modelu każdy automat jest reprezentowany przez okrąg w obrębie cyfrowego pola. Jego zachowanie – dyfuzja, reakcja i przepływ energii – jest kontrolowane za pomocą suwaków i przycisków, które modyfikują parametry w czasie rzeczywistym. Projektant wchodzi w ten sposób w bezpośrednią interakcję z procesem generatywnym, obserwując, jak każda zmiana przekształca ewoluujący system.

Głównymi parametrami są:

1. **Szybkość dyfuzji (D):** określa, jak daleko i jak szybko automat rozprzestrzeni swój wpływ. Wyższa dyfuzja powoduje płynne przejścia; niższa pozwala zachować ostre granice.
2. **Szybkość reakcji (R):** określa, jak silnie automat oddziałuje z innymi automatami. Wysoka szybkość reakcji powoduje burzliwe,

energiczne zachowanie, natomiast niska szybkość skutkuje tworzeniem spokojnych i stabilnych struktur.

3. Ekspansja (E): reguluje rozmiar automatów komórkowych.



Ryc. 12 Szkló Fussil. Źródło: Własne badanie, ilustracja infograficzna.

Zmieniając te wartości, projektanci wykonują rodzaj cyfrowej choreografii. Każdy gest, każda regulacja wywołuje falę zmian w systemie, zmieniając jego rytm i równowagę. Akt projektowania staje się tymczasowy – bardziej przypomina dyrygowanie utworem muzycznym niż komponowanie statycznej formy.

Interfejs umożliwia również łączenie wielu automatów, co pozwala na tworzenie ekosystemów wielogatunkowych w przestrzeni cyfrowej. Podczas interakcji podmioty te tworzą złożone krajobrazy wizualne przypominające procesy organiczne.

Rola projektanta zmienia się z twórcy na obserwatora, z kontrolera na odbiorcę tego, czym system chce się stać. Interfejs Fussil staje się zatem czymś

więcej niż narzędziem obliczeniowym; jest medium dialogu między człowiekiem a algorytmem, między intencją a powstawaniem formy (Ryc. 11).

5.3. Narzędzie projektowe Fussil Design Tool

W tym miejscu powracamy do naszych podstawowych pytań – czterech przyczyn: materiału, formy, sprawczości i celu – które wyznaczają parametry Szkló Fussil.

Jakie jest środowisko naszego szkła? Jakie są jego podstawowe zasady? Jak powstaje? Jak się komunikuje? Szkló Fussil nie jest deterministyczne, lecz eksploracyjne. Nie otrzymujemy idealnych warunków, w ramach których powstanie organizm, lecz sami ustalamy te warunki i eksplorujemy zaprojektowane wyniki (Ryc. 12).

Projektant eksperymentuje z parametrami i czynnikami. Niektóre czynniki wytworzą bardzo wąskie środowisko, a zatem mniejszą liczbę wyników, inne dadzą szeroki zakres organizmów. W niektórych przypadkach środowisko może ulegać nadmiernemu zagęszczeniu, w innych – popadać w chaos. Jednak poprzez regulowanie tych czynników możemy uzyskiwać określone efekty, które następnie znajdują zastosowanie w projektowanym systemie.

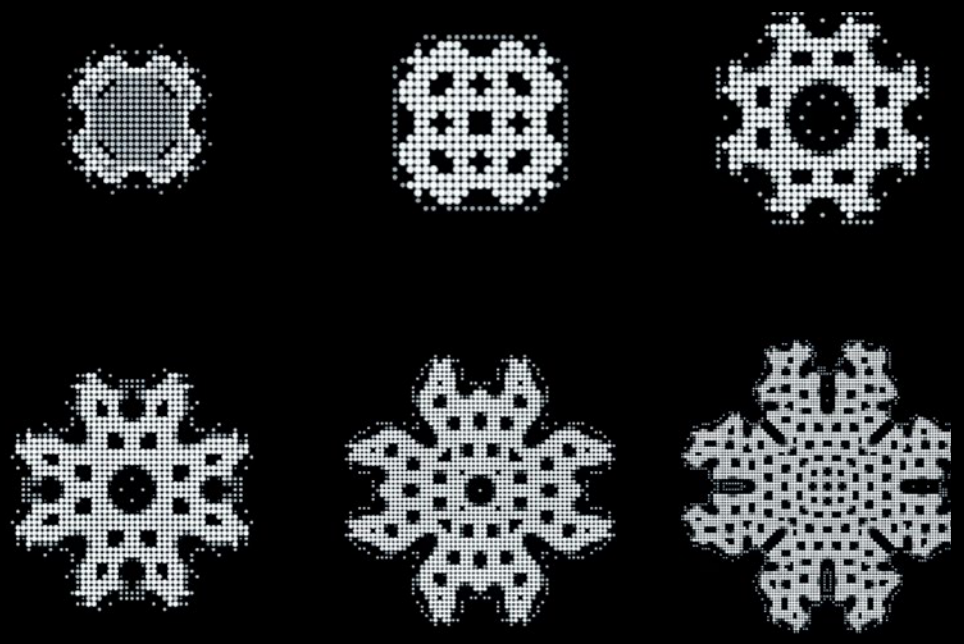
5.4. Wzory fussil

5.4.1. Koralkowe fussil

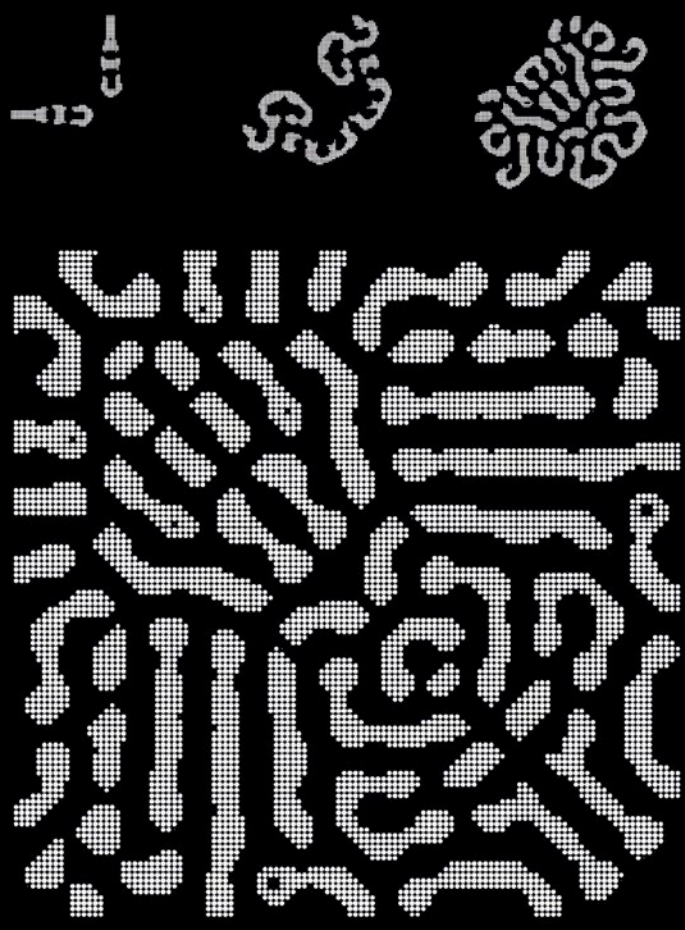
Pierwszym typem fussil, który można wygenerować, jest fussil koralkowy (Ryc. 13). Składa się on z centralnego ciała oraz rozgałęziających się we wszystkich kierunkach wypustek. Z upływem czasu stopniowo się rozrasta, a dalszy kształt organizmu można obserwować poprzez zmiany tempa jego ekspansji. Nie tworzą one wyłącznie jednolitego ciała – mogą się także od siebie oddzielać, tworząc wówczas różne autonomiczne jednostki. Badając otoczenie, można zauważyć, że produkcja nowych jednostek nie przebiega tutaj równomiernie, jak w przykładach Turinga czy Conwaya, lecz proces ich podziału przypomina raczej mitozę ameb. Zmiana parametrów sprawia, że koralkowe fussils mogą modyfikować swój kształt. Ograniczenie dyfuzji umożliwia im osiągnięcie stabilnych stanów w czasie.

5.4.2. Gupikowe fussils

Zmieniając kilka parametrów, możemy badać również inne typy fussils. Poprzez modyfikacje macierzy i konwolucji możemy rozwijać bardziej



Ryc. 13 Muszle koralowe.
Źródło: Opracowanie własne, eksperyment cyfrowy z p5.js



Ryc. 14 Tekstury gupików z fussilami.
Źródło: Opracowanie własne, eksperyment cyfrowy z p5.js

zorientowane na teorię Turinga wzory z „oddechającymi” automatami. Dzięki temu fussels nie rozpuszczają się w otoczeniu, lecz duplikują się w takim stopniu, że tworzą różnorodne naturalne wzory. Ponieważ przypominają wiele motywów obserwowanych na rybach gupikach, nazwano je gupikowymi fussels (ang. guppy fussels) (Ryc. 14).

Jedną z bardziej interesujących form, jakie mogą przyjmować fussels, jest struktura przypominająca łuskę gupika. Charakteryzuje się ona specyficzną organizacją, która umożliwia powstawanie „oddechającego”, łuskowatego wzoru. W trakcie dynamicznej symulacji można zauważyć, że wzór ten wykształca porowatą strukturę wyłącznie w wyniku oddziaływania parametrów systemu.

Eksperymentowanie z tego typu wzorami daje projektantom szerokie możliwości pracy z parametrami. Niektóre rezultaty mogą przybierać szczególnie eksperymentalny charakter, zwłaszcza gdy parametry zmieniają się w czasie.

5.4.3. Fussil gepardzi

Bardziej spójne podejście realizowane jest poprzez konstrukcję fussels gepardzich. Rosną one szybko tworząc jednolity wzór przypominający umaszczenie geparda. Interesującą cechą tych wzorów jest ich niezniszczalność. Gdy raz wyrosną w środowisku, tworzą wzór, który po uszkodzeniu może samodzielnie się odbudować (Ryc. 15).

Po określeniu materii, formy i sprawczości pozostaje nam jeszcze przyczyna celowa. Fussels umożliwiają badanie celu w dwóch wymiarach. Możemy stworzyć środowisko, obserwować, jak się wylania i ulega transformacji, a nasza rola staje się wówczas czysto eksploracyjna – obserwujemy reakcje, rozumiemy podstawowe zasady i na ich podstawie budujemy nowe algorytmy. Ogólny automat komórkowy nie jest tu traktowany jako niezmienny algorytm, lecz jako dynamiczny system rozwojowy.

W tym miejscu przechodzimy do kolejnego etapu naszych badań i rozpoczynamy kolejny etap projektowania morfogenetycznego.

1. Projektowanie inspirowane naturą: tworzenie algorytmów morfogenetycznych, zasad i czynników projektowania parametrycznego.
2. Tworzenie wzorów i organizmów, które możemy kontrolować i wykorzystywać do różnych celów. W ten sposób tworzymy



Ryc. 15 Tekstury geparda z fussilami.

Źródło: Opracowanie własne, eksperyment cyfrowy z p5.js



Ryc. 16 System siatki narzędzia projektowego Fussels.

Źródło: Opracowanie własne, eksperyment cyfrowy z p5.js

projekty morfogenetyczne – załączki nowych struktur.

3. Zastosowanie projektowania w środowisku naturalnym: tworzenie tekstur, środowiska, budynków i ubrań o nowym przeznaczeniu i złożoności wizualnej.

5.5. Modułowa siatka fussil

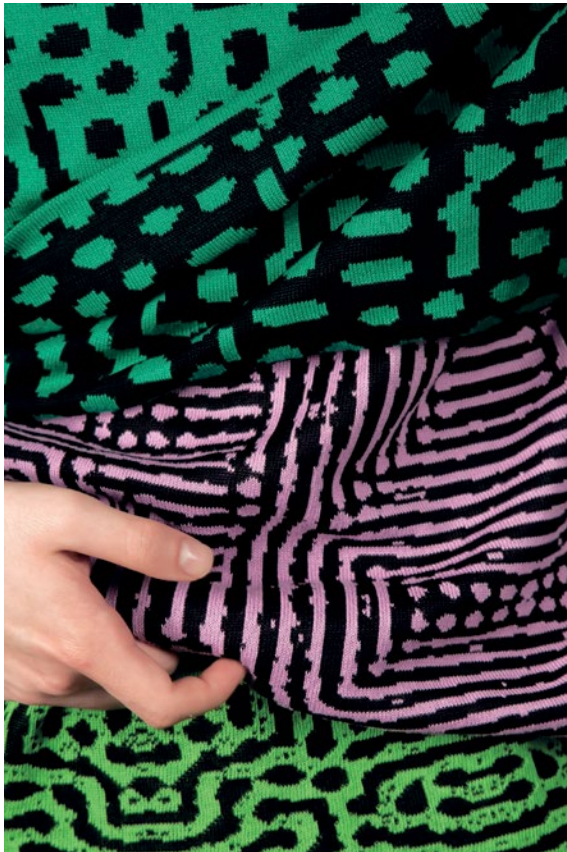
Podczas gdy Szkło Fussil bada organiczne kształtowanie się formy, modułowa siatka Fussil ponownie wprowadza porządek i strukturę, łącząc zachowanie generatywne z zasadami projektowania kompozycyjnego. Każdy wzór generowany przez system może zostać zawarty w jednostce modułowej – elemencie, który zachowuje swoją wewnętrzną dynamikę, a jednocześnie płynnie łączy się z innymi.

Ułożone w siatkę moduły oddziałują na siebie w strefach styku, tworząc drugą warstwę złożoności: dialog między lokalną zmiennością a globalną spójnością. Odzwierciedla to sposób, w jaki komórki tworzą tkanki lub jak poszczególne elementy łączą się w struktury architektoniczne [18, 19].

Projektanci mogą manipulować tymi modułami poprzez obracanie, odbicie lustrzane lub ska-



Ryc. 17 Projekt tkanin z wzorami fussil.
Źródło: Fotografia Hany Podvršić.



lowanie, tworząc mozaiki przechodzące od jednolitości do różnorodności. W przeciwieństwie do tradycyjnych systemów modułowych moduły fussil nie są statyczne – ewoluują wewnątrz swoich komórek, generując nieustannie zmieniającą się powierzchnie.

Ta zdolność adaptacyjna otwiera drogę do wielu zastosowań: generatywnych tkanin, które nigdy się nie powtarzają, paneli architektonicznych reagujących na dane środowiskowe [20, 21] czy biżuterii, która subtelnie zmienia się w czasie [22]. Każdy rezultat zachowuje żywy charakter swojego pochodzenia – poczucie, że forma pozostaje w ruchu i nieustannie negocjuje własne istnienie.

Modułowa siatka fussil łączy zatem generatywność obliczeniową z praktyką projektową, ukazując, w jaki sposób „żywe” algorytmy mogą wpływać nie tylko na estetykę, lecz także na produkcję, funkcjonalność oraz odbiór dotykowy.

Ryc. 18 Projekt tkanin z wzorami fussil.
Źródło: Fotografia Hany Podvršić.



Ryc. 19 Wazon Fussil: Turris.
Źródło: Fotografia Hany Podvršič.

Ryc. 20 Waza Fussil: Tripedala.
Źródło: Fotografia Hany Podvršič.



5.6. Produkt fussil

Inspirowane architekturą organiczną oraz cyklicznymi procesami zachodzącymi w naturze, możliwości systemu Fussil nie ograniczają się jedynie do modułowych wzorów, lecz obejmują także materiały i produkty wykorzystujące te procesy.

Fussil gepardzi był jednym z kluczowych elementów prowadzących do opracowania elastycznego materiału. O jego sprężystości decyduje sieć regularnie rozmieszczonych perforacji wewnątrz wzoru, które tworzą stosunkowo stabilną strukturę wzdłuż wszystkich osi. Dzięki temu, po wydrukowaniu w technologii 3D, materiał może wykazywać zwiększoną elastyczność przy jednoczesnym zachowaniu odporności na pękanie. Podobne efekty strukturalne można zaobserwować również w materiałach tekstylnych (Ryc. 17, 18).

Każde ziarno wiąże się z procesem wzrostu. W trakcie badań i eksperymentów proces ten był w większości analizowany w dwuwymiarowej przestrzeni projektowej. Ponieważ jednak nasze ziarno zawiera pełen zestaw procesów morfogenezy, możliwe jest przeniesienie kolejnych etapów rozwoju na dodatkową – trzecią – oś przestrzeni. W ten sposób Fussil Design Tool wprowadza dodatkowy element projektowy: wymiar czasoprzestrzenny. W tym systemie poszczególne warstwy odpowiadają kolejnym fazom ewolucji początkowego projektu. Reprezentują one kolejne etapy czasu, w których ujawniają się procesy wylaniania, ewolucji i zaniku. Ułożone pionowo wzdłuż osi Z tworzą nową przestrzeń obserwacji – produkt fussil.

Z jednego ziarna projektowego można wygenerować wiele różnych obiektów – od form prostych i jednorodnych po struktury o znacznej złożoności. Jednym z przykładów przekształcenia takiej struktury w produkt fizyczny jest wazon (Ryc. 19, 20). Wazony te, początkowo zaprojektowane w środowisku cyfrowym, są następnie materializowane w postaci ceramicznych obiektów wykonanych z gliny – trwałego materiału, który symbolicznie łączy współczesne technologie projektowe z naturalnym pochodzeniem materii. Jako medium i metafora, glina zakotwicza rzeczywistość cyfrową w świecie organicznym, przekładając abstrakcyjne algorytmy na formę dotykową. Obiekty te pełnią podwójną funkcję: stanowią zarówno rzeźbiarskie eksploracje biologicznej estetyki, a zarazem użytkowe przedmioty przeznaczone do codziennego użytku. W ten sposób projekt redefiniuje relację między technologią a tradycją, proponując wizję przyszłości, w której projektowanie nie tylko naśladuje naturę, lecz także świadomie z nią współpracuje.

6. Podsumowanie

Pomarańcza nigdy nie wiedziała, co pozostawiła po sobie. A może zawsze wiedziała, czego pragnie [23, 24], dając nam nasiona, wiedzę o swojej złożoności, genezie, ewolucji, odwołując się do naszych instynktów badawczych i kreatyw-

ności, które doprowadziłyby do zbadania pierwotnych elementów natury i jej algorytmu.

XX wiek był okresem intensywnego zgłębiania tych mechanizmów. Conway i Turing w istocie stworzyli wszystkie niezbędne elementy do dalszej analizy procesów morfogenetycznych – mechanizmów, które stały się punktem wyjścia dla moich badań i otworzyły nowy sposób myślenia o naturze. „Wszystko jest maszyną” – argumentowali w 1983 roku Gilles Deleuze i Félix Guattari [25]. Jednak informacja jest kategorią wspólną, którą mogą dzielić algorytmy i natura, tworząc spójną myśl. Ponieważ wszystko jest maszyną, wszystko jest też naturą.

Przez pryzmat automatów komórkowych, reakcji-dyfuzji i obliczeń ewolucyjnych, Fussil Design ukazuje, że mechanizmy życia i logika algorytmów opierają się na wspólnej podstawie – generatywnym potencjale sprzężenia zwrotnego.

Łącząc te mechanizmy w narzędziu Fussil Design Tool, niniejsza praca proponuje nowy paradygmat tworzenia: projektowanie jako współlistnienie. Projektant nie pełni już roli mistrza formy, lecz współpracownika cyfrowych organizmów posiadających własną sprawczość. Dzięki interakcji z Fus-

sil Design Tool projektanci mogą odkrywać nowe relacje między kontrolą a powstaniem, intencją a nieprzewidywalnością, autorstwem a ewolucją.

Przyszłość badań projektowych niesie ze sobą możliwości dotąd nieosiągalne: materiały reagujące na bodźce, adaptacyjne architektury oraz samoorganizujące się artefakty, które ucieleśniają inteligencję ekologiczną. Każdy fustil staje się małym manifestem nowego sposobu tworzenia – takiego, który uznaje sprawczość zarówno kodu, jak i materii.

Projektowanie z udziałem natury oznacza uznanie, że nie jesteśmy poza jej logiką, lecz jej wyrazem. Pomarańcza, algorytm i artefakt należą do tego samego kontinuum ewolucji.

Ostatecznie Fussil Design to nie tylko system generowania formy – to filozofia współuczestniczącego tworzenia, w której inteligencja ludzka i algorytmiczna spotykają się we wspólnym dążeniu do wzrostu, adaptacji i kształtowania piękna. ■

Strahinja Jovanović

Przypisy

1. Xu Q., Nature genetics: The draft genome of sweet orange (*Citrus sinensis*), 2023, dostęp: 29.08.2024, <https://www.nature.com/articles/ng.2472>
2. Munari B., Design as Art, Penguin Classic, 2019.
3. Lewens T., Organisms and Artifacts: Design in Nature and Elsewhere, MIT Press, Cambridge (MA), 2004.
4. Dennett D. C., Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life, Penguin Books Ltd, 1995.
5. Darwin C., On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life, New York: D. Appleton & Company, 1946. Cyt. za: Dennett C. D., Darwin's dangerous idea: evolution and the meanings of life, London: Penguin Books, 1995, s. 50.
6. Gardner M., Mathematical Games – The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life", Scientific American, nr 223, 1970.
7. Turing A., Chemical Basis of Morphogenesis, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, t. 237, nr 641, 1952, s. 37-72.
8. Pearson J., Complex Patterns in a Simple System, Science, t. 261, 1993, s. 189.
9. McGough J. S., Riley K., Pattern Formation in the Grey-Scott Model, Nonlinear Analysis: Real World Applications, t. 5(1), 2004, s. 105-121.
10. Murray J. D., Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications, 3. wydanie, Springer, 2003.
11. Sims K., Reaction-Diffusion, 2013, dostęp: 20.10.2023, <https://www.karlsims.com/rd.html>
12. Minsky M., Papert S., Symbolistic Concept Towards Understanding Machine Learning, MIT Press, 1988.
13. Siegle E., Did the Universe have zero entropy when it first began?, Big Think, 22.02.2024, dostęp: 20.03.2024, <https://bigthink.com/starts-with-a-bang/universe-zero-entropy/>
14. Davies J., Mechanisms of Morphogenesis: The Creation of Biological Form, Elsevier Academic Press, Edinburgh, 2005.
15. Turner A., A Simple Model of Belusov-Zhabotinsky Reaction from First Principles, Bartlett School of Graduate Studies, University College London, 2009.
16. Rafler S., Generalization of Conway's "Game of Life" to a continuous domain – SmoothLife, arXiv preprint arXiv:1111.1567, 2011, dostęp: <https://arxiv.org/abs/1111.1567>
17. Chan B. W. C., Lenia: Biology of Artificial Life, Complex Systems, 2018; 28(3): 251-86, dostęp: https://www.complex-systems.com/abstracts/v28_i03_a01/
18. Owen J., Grammar of Ornament, Princeton University Press, nowa edycja, 2019.
19. Studio Filippo Nasseti, Body Architecture, Parametric Architecture, 2022, dostęp: 29.08.2024, <https://parametric-architecture.com/body-architecture-studio-filippo-nasseti/>
20. Conti M., The incredible inventions of intuitive AI, 2016, dostęp: 29.08.2024, https://www.ted.com/talks/maurice_conti_the_incredible_inventions_of_intuitive_ai
21. Pietila R., Pietila R., Dipoli [Internet], Architectuur, 12.04.2019, dostęp: 17.03.2024, <https://architectuur.com/architecture/dipoli>
22. Oxman N., A visionary of 3-D-printed fashion, MIT Press, 2014, dostęp: 29.08.2024, <https://neri.media.mit.edu/press/article/a-visionary-of-3-d-printed-fashion.html>
23. Harman G., Object-Oriented Ontology: A New Theory of Everything, Penguin Books, St Ives, 2017.
24. Latour B., Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts, w: Bijker W., Law J. (red.), Shaping Technology/Building Society: Studies in Sociotechnical Change, MIT Press, 1992.
25. Deleuze G., Guattari F., Anti-Oedipus: Capitalism and Schizophrenia, University of Minnesota Press, 1983.