

PORTFOLIO:

Opracowanie koncepcji budowy modelu umożliwiającego reprezentacje stylów i tendencji architektonicznych celem wspomagania procesu projektowania obiektów architektonicznych.

Autorzy: Tadeusz Szuba, Ryszard Tadeusiewicz, Andrzej Kadłuczka

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl

PROJEKT BADAWCZY „WIRTUALNY ANTONIO GAUDI”

RAPORT ETAPOWY: STUDIUM WYKONALNOŚCI

1. Założenia projektu.

Ogólna koncepcja projektu zakłada podjęcie prac nad zbudowaniem formalnego a następnie komputerowego (obliczeniowego w sensie symulacji) modelu psychiki wielkiego hiszpańskiego architekta Antonio Gaudiego - w zakresie jego zdolności artystyczno-architektonicznych.

Planowany do zbudowania model byłby w dalszej perspektywie zweryfikowany pod kątem zdolności do wirtualnego dokończenia katedry Sagrada Familia i sprawdzenie czy „Wirtualny Gaudi” (WG) zrobi to lepiej, niż zamierza (zdoła) zrobić to „człowiek”, aktualnie architekt (Katalończyk) Jordi Fauli i Oller¹ któremu zlecono dokończenie prac. Dokończenie katedry przez niego planowane jest na lata 2026 - 2030.

2. Uczestnicy projektu. (faza Studium wykonalności, w układzie alfabetycznym)

- Andrzej Kadłuczka; prof. zw. dr hab. inż. architekt; Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. Dyrektor Instytutu Historii Architektury i Konserwacji Zabytków.
- Tadeusz Szuba; prof. nzw. AGH, Katedra Informatyki Stosowanej AGH.
- Ryszard Tadeusiewicz, prof. zw. dr hab. inż.; Kierownik Katedry Automatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH.

3. Koncepcja naukowa.

Aktualnie zostanie omówiony pierwszy z elementów metodologicznych zastosowanych w projekcie, tj. gramatyki kształtu.

3.1. Gramatyki kształtu w zastosowaniu do opisu realizacji A. Gaudiego

Koncepcja naukowa zakłada zapisanie przy pomocy tzw. gramatyk kształtu kolejnych architektonicznych realizacji Antonio Gaudiego w ciągu jego życia. Jest to możliwe, co

¹ http://www.sagradafamilia.cat/sf-eng/docs_instit/fundacio.php?lang=0

pokazała praca dyplomowa wybitnie uzdolnionych studentów informatyki². Znaczenie gramatyk kształtu zostało dostrzeżone³ na poziomie MIT, ale nie na taką skalę jak my proponujemy. Studenci ci, będąc „tylko informatykami”, bez przygotowania artystyczno-architektonicznego, zdołali zapisać pojedyncze realizacje Gaudiego jako gramatyki kształtu, a potem zdołali zbudować generator wykorzystujący te gramatyki do tworzenia fantazyjnych obiektów w stylu Gaudiego. „Zabawy” dyplomantów z gramatykami kształtu symulującymi A. Gaudiego robią wrażenie jeśli chodzi o rezultaty.

Aktualnie kolejny dyplomant na poziomie pracy dyplomowej inż. bada na przykładzie tzw. „rycerzy Gaudiego” zaproponowaną przez prof. Szubę pół-automatyczną metodologię produkcji gramatyk kształtu dla danego obiektu Gaudiego. Polega ona na rejestracji przy pomocy kamery, procesu jak „człowiek rysuje dany obiekt Gaudiego w sensie stosowanych prymitywów graficznych i kolejności ich użycia”. Wszystko wskazuje na to, że da się zrobić taki system tworzenia gramatyk kształtu.

Należy tutaj podkreślić następujące elementy:

- Muszą zostać zapisane jako gramatyki kształtu wszystkie realizacje Gaudiego w sekwencji chronologicznej, bowiem to określa rozwój jego psychiki artystyczno-architektonicznej.
- Ponadto „rozbiór/analiza” realizacji Gaudiego przy pomocy gramatyk kształtu musi być realizowana przez architekta, który będzie rozumiał koncepcje budynku zaprojektowanego przez Gaudiego. To tłumaczy znaczenie dla projektu prof. Andrzeja Kadłuczki i osób z nim związanych. Zakłada się, że „informatycy stworzą system typu CAD” dla tworzenia gramatyk kształtu (patrz „rycerze Gaudiego”) ale konkretne gramatyki kształtu przy użyciu w/w systemu CAD będą już tworzyli np. doktoranci-architekci.

Dysponując gramatykami kształtu uszeregowanymi chronologicznie, dochodzimy do punktu, gdzie można pokusić się o podjęcie prac nad meta-gramatyką, która będzie opisywała ewolucję gramatyk kształtu odpowiadających poszczególnym realizacjom, w miarę jak Antonio Gaudi rozwijał się artystycznie i ewolucyjnie. Jest to b. teoretyczny, przyszłościowy fragment projektu. Aktualnie zaczynają się pojawiać publikacje w zakresie ewolucji gramatyk, pod tytułem „evolving grammars”⁴.

Zakładając, że udałooby się dla umysłu A. Gaudiego taką meta-gramatykę zbudować, stajemy przed możliwością ekstrapolacji rozwoju artystycznej psychiki Antonio Gaudiego poza punkt jego tragicznej śmierci w wypadku 7 lipca 1926. Ekstrapolacja oznacza tu, że dla niedokończonej Sagrada Familia (stan z 7.07.1926) zostanie zbudowana gramatyka kształtu, natomiast meta-gramatyka „podpowie nam” jak tę gramatykę „dokończyć”. Mając taką dokończoną gramatykę możemy już wirtualnie wygenerować obraz 3D jak powinna wyglądać Sagrada Familia.

² Szymon Adamczyk, Paweł Baron: „Analiza możliwości stworzenia formalizmu dla generowania w grafice 3D obiektów architektonicznych w stylu Antonio Gaudiego”. AGH 2006. Praca dyplomowa mgr. inż.

³ http://home.fa.utl.pt/~albertidigital/AD_VER1011/files/aula05/aula05_shapeGrammars.pdf

⁴ <http://www.grammaticalevolution.org/>

W punkcie 4 Raportu prof. Kadłuczka, z punktu widzenia „doświadczonego architekta” analizuje koncepcje opisu twórczości Gaudiego przy pomocy gramatyki kształtu.

To podejście jest niewątpliwie atrakcyjne naukowo, ale jak się wydaje trudne do zrealizowania, a co najważniejsze do uzyskania jednoznacznego obrazu 3D katedry Sagrada Familia. Dlatego też proponowane jest pójście naukowo o krok dalej, wykorzystując ewolucję sieci neuronowych.

Przypuszczalnie jest to najtrudniejszy etap projektu, ponieważ nie istnieją aktualnie sieci neuronowe generatywne. Wygląda na to, że koniecznym będzie wymyślenie/stworzenie nowego typu sieci neuronowych. Implikuje to znaczenie prof. Tadeusiewicza dla tego projektu. Jest to ogromne wyzwanie naukowe w sensie sztucznych sieci neuronowych.

Dodatkowym teoretycznym atutem tego podejścia jest to, że otrzymalibyśmy „gotowy komputer” który będzie gotowy do zobrazowania dokończonej Sagrada Familia.

W ramach tego podejścia, każda wytworzona na poprzednim etapie przez architektów i informatyków gramatyka kształtu, odpowiadająca konkretnej realizacji Antonio Gaudiego, byłaby odwzorowywana do sztucznej sieci neuronowej, zdolnej do „wyartykułowania” takiej gramatyki kształtu. Tak więc, w oparciu o symulatory sieci neuronowych, na każdym etapie istniałby już „komputer” zdolny do wygenerowania danej realizacji Antonio Gaudiego.

Postępowanie na tym poziomie przypomina to, przedstawione wcześniej. Innymi słowy dla danego ciągu zrealizowanych sieci neuronowych, szukana byłaby metodyka ewolucji tej sieci; tak aby odzwierciedlić rozwój i zmianę mózgu Antonio Gaudiego.

Po zakończeniu tego etapu, nastąpiłby „finalny akord” czyli ekstrapolacje sieci neuronowej poza moment śmierci Antonio Gaudiego i uruchomienie tej sieci w oparciu o istniejące dane wejściowe (stan Sagrada Familia taki jakim zostawił go Gaudi). Taka sieć neuronowa pobudzona aktualnym stanem Sagrada Familia, powinna być zdolna do dokończenia jej.

W części 5 Raportu, prof. Tadeusiewicz dokonuje analizy umysłu Antonio Gaudiego tak aby móc potem przystąpić (w kolejnym etapie projektu) do tworzenia systemu modelującego umysł Gaudiego.

3.2. Potencjał inspiracyjny projektu.

Pojawia się zdumiewająco dużo możliwych „odgałęzień” tego projektu naukowego, na bardzo różnych obszarach badawczych. Istotnym jest to, że każdorazowo naukowcy będą pracowali w środowisku gdzie istnieje b. wyraźna interpretacja wyników, co pozwala na „intuicje”⁵. Proponowane podejście naukowe ma charakter nowej metodyki badawczej i już teraz rysują się perspektywy zastosowania tej metodyki na innym niż architektura obszarze sztuki (patrz poniżej).

⁵ Oracle w sensie Alana Turinga. Źródło: http://en.wikipedia.org/wiki/Oracle_machine

Rysujące się obszary badawcze:

- Formalne badania nad gramatykami i meta-gramatykami kształtu, osadzone w bardzo realistycznym i inspirującym środowisku;
- Badania nad zupełnie nowymi typami sieci neuronowych, zdolnych nie do rozpoznawania ale do generacji obiektów. Sieci neuronowe „wkraczają do grafiki komputerowej” , ale głównie do sterowania awatarów (prace D. Terzopoulos’a⁶). W ramach omawianych badań sztuczna sieć neuronowa uzyskuje bezpośrednio zdolności kreatywne w zakresie kształtu obiektu – tutaj artystycznej struktury architektonicznej;
- Badania nad sztucznymi sieciami neuronowymi w zakresie ich ewolucji, wykorzystania w architekturze, etc.
- Podjęcie próby na zasadzie „reverse engineering” odwzorowania działającej sieci neuronowej na współpracujące struktury w mózgu człowieka-architekta. Magnetyczny Rezonans Jądrowy pozwala na śledzenie aktywności mózgu podczas określonych czynności mentalnych. W ramach tematyki projektu Wirtualny Gaudi można będzie przypuszczalnie równolegle śledzić prace mózgu i prace sieci neuronowej modelującej tą właśnie czynność. W ten sposób może uda się lepiej zrozumieć prace mózgu w sferze działalności artystyczno-architektonicznej.
- Prace nad b. zaawansowanymi systemami CAD dla potrzeb architekta w ramach tematu „instant architecture”. Tutaj system CAD wspomagający architekta uzyskałby wyższy poziom mentalny.
- **Jak już było wspomniane, zaproponowane podejście naukowe polegające na stworzeniu modelu umysłu Wielkiego Twórcy i ekstrapolacji jego umysłu poza punkt jego śmierci ma charakter ogólnej metodologii badawczej.**

Można np. pokusić się o przeprowadzenie podobnego postępowania badawczego w kierunku stworzenia X-symfonii Beethoven’a⁷. Zasadnicza różnica i trudność polegała by na znalezieniu odpowiednika gramatyk kształtu dla utworów muzycznych. Punktem wyjścia jak się wydaje jest aktualnie stosowany zapis nutowy albo „obraz dźwięku” w formie graficznej, szereg Fouriera, etc. .

3.3. Możliwości współpracy międzynarodowej.

Istnieje fundacja, która ma dokończyć budowę katedry, dysponująca odpowiednimi funduszami. Na stronie www tej fundacji (http://www.sagradafamilia.cat/sf-eng/docs_instit/fundacio.php?lang=0) wyraźnie wspomniano, że fundacja zakłada intensywne wykorzystanie technik komputerowych. Jak się wydaje, można będzie zaproponować tej fundacji konstruktywną współpracę na wygodnym dla nas poziomie i warunkach. Być może istnieje możliwość nawiązania współpracy naukowej na tym polu z MIT a konkretnie z prof. Terry Knight zajmującą się gramatykami kształtu w architekturze.

⁶ <http://www.cs.ucla.edu/~dt/papers/siggraph06/siggraph06.pdf>

⁷ Ludwig van Beethoven skomponował (w latach 1799-1824) dziewięć symfonii; niedługo przed śmiercią rozpoczął też szkicowanie dziesiątej. Źródło: http://pl.wikipedia.org/wiki/Ludwig_van_Beethoven

3.4. Potencjał grantowy.

Gaudi podobnie jak Beethoven są symbolami zjednoczonej Europy. Tak więc jest wysoce prawdopodobne, że po uzyskaniu przekonujących wstępnych rezultatów będzie możliwe uruchomienie dużego grantu europejskiego, pod polskim przewodnictwem. Dokończenie katedry Sagrada Familia wg. aktualnych założeń planowane jest na lata 2026 - 2030, co daje nam spokojną perspektywę badawczą.

4. ANTONI GAUDI: Próba odczytania i interpretacji gramatyki kształtów architektury Antonio Gaudiego. Autor: prof. Andrzej Kadłuczka

Gramatyka kształtów jest współcześnie rozwijaną metodą wykorzystującą narzędzia cyfrowe, szczególnie przydatną w modelowaniu budynków, ich architektury, a także w monitoringu i interpretacji dzieł mistrzów architektury i grafice komputerowej, jak również w teorii projektowania⁸.

Podobnie jak to ma miejsce w gramatyce lingwistycznej elementy, które są poddawane procesowi transformacji to *symbole-znaki* i *reguły* tworzące określone między nimi relacje definiujące zespoły cech formalnych charakterystycznych dla śledzonego nurtu, szkoły artystycznej, czy twórcy, wykorzystywane, aby w sposób mniej lub bardziej czytelny przekazywać treści ideowo-artystyczne (tożsamość dzieła) i materialno-strukturalne (funkcja dzieła) istotne dla twórcy z punktu widzenia właściwego znaczenia i odbioru jego dzieła.

Architecture parlante, architektura która mówi, wyjaśnia - to termin po raz pierwszy użyty przez Antoine-Laurent-Thomasa Vaudoyera, (1756–1846) architekta francuskiego zwolennika purystycznych stereometrycznych form, pozostającego pod wpływem teoretycznych rozwiązań Claude-Nicolas Ledoux (1736–1806), uwięzionego w czasie Rewolucji Francuskiej architekta -wizjonera twórcy utopijnego miasta idealnego, w którym nadawane budowlom publicznym formy miały istotne znaczenie dla percepcji i psychologicznego odbioru architektury.

⁸ B. Tepavčević, V. Stojaković, *Shape Grammar in Contemporary Architectural. Theory and Design*, w: Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 10, No 2, 2012, s. 169-178, Autorzy definiują pojęcie *shape grammar*: "The term shape grammar may be described and considered on two levels – computational and visual-spatial.

In computational theory, shape grammars are specific classes of rule-based expert systems in artificial intelligence which generate geometric shapes. A shape grammar consists of shape rules and a generation engine that selects and processes rules recursively, starting from an initial shape. Rules are used to specify a way of replacing particular shapes and to describe the manner of replacing. Underlying the rules are geometric transformations i.e. translation, scale, rotation, reflection, that permit one shape to be a part of another. A distinctive feature of shape grammar is that a set of finite number of rules and shapes may generate an indefinite number of design solutions. Moreover, it can be used as an analysis tool, for decomposition of complex shapes and as a synthesis tool, generating complicated forms starting from a simple shape.

Shape grammar can also be defined as a formalism to represent visual, or even spatial, thinking. The phrase 'shape grammars' more literally refers to visual design grammars. In that sense, shape grammar represents the philosophy of looking at the world that is not through learnt or imposed decompositions, but through those that have a practical meaning at that point in time. It is important to emphasize that spatial aspect of shape grammars was crucial for its implementation in contemporary architectural theory and design framework. Application of shape grammar in architectural theory and design had a history four decades long. In the academic circles of architects, shape grammar was adopted long before conventional drafting CAAD (Computer-aided architectural design) tools were developed." s.170

Dzieło architektury staje się zatem istotnym elementem w badaniach nad strukturą rzeczywistości: wyjaśnianiem problematyki związanej z pojęciami bytu, istoty, istnienia, przed-miotu, przyczynowości, czasu, przestrzeni, konieczności i możliwości, a zatem jest podmiotem ontologii lub metafizyki. W badaniach dzieł Antonio Gaudiego mogą być szczególnie przydatne narzędzia stosowane przez zwolenników metafizyki skoro, co wiemy z życiorysu artysty, wiara odgrywała istotną rolę tak w procesie postrzegania przez niego świata jak i w procesie twór-czym, dedykowanym porządkowi ustanowionemu przez Stwórcę Universum i opartego mocno na symbolice i metaforyce religijnej.

Pochodząca jeszcze z czasów dzieciennych i młodzieńczych fascynacja formami występującymi w przyrodzie, w powiązaniu z głęboką religijnością Gaudiego i profesjonalnym, perfekcyjnym warsztatem architektonicznym, stworzyły podstawy dla szczytowego osiągnięcia jakim był kościół Sagrada Familia, „*unique in the field of architecture and an extraordinary example of a pragmatic, yet astonishingly elegant design approach. Representing an outstanding cultural and intellectual achievement, these aesthetics and the underlying geometric concepts are consequently of great public interest yet at the same time anything but easy to understand*”⁹.

Antonio Gaudi urodził się 25 czerwca 1852 roku w Reus koło Tarragony w Katalonii w wielodzietnej rodzinie rzemieślniczej. Przez niektórych badaczy twórczości Gaudiego samo miejsce urodzin jest podważane na podstawie własnych deklaracji artysty, jakoby miał urodzić się w Riudoms, skąd miała pochodzić rodzina ze strony ojca¹⁰. Cięża i poród nie były łatwy i przebiegały w dramatycznych okolicznościach, co sprawiło, że ojciec ochrzcił syna w godzinę po narodzeniu powierzając duszę noworodka Bogu¹¹. Mały Antonio był dzieckiem łatwo zapadającym na choroby i po ostrej infekcji płuc przebył zapalenie stawów, cierpiąc w konsekwencji na przewlekły reumatyzm¹². Trudne dzieciństwo i atmosfera religijnego domu stała się podstawą mistycznego postrzegania świata przez Gaudiego już od młodych lat. Czas lat dziecięcych i młodzieńczych spędzał stale w stronach ojczystych w Katalonii, a wędrowki piesze i konne jej szlakami pozwoliły mu, często w osamotnieniu i natchnionej kontemplacji poznać naturę i studio-wać piękno przyrody i jej symbiozę ze światem roślin i zwierząt.

Studia architektoniczne rozpoczął w słynnej szkole Llotja, a ukończył je i dyplom uzyskał w Wyższej Szkole Architektury w Barcelonie w 1878, pracując w czasie studiów w kilku pracowniach znanych architektów i konstruktorów.

Interesujące studium intelektualno-kulturowych korzeni architektury Gaudiego dała Joan Aicart z Universitat International de Catalunya, podejmując próbę interpretacji jego dzieł, a zwłaszcza kościoła Sagrada Familia, jako głęboko osadzonych w tradycji kulturowej Śródziemnomorza i sięgających po metaforyczne znaczenia i religijny system symboli, charakteryzujące ten szczególnie obszar cywilizacyjny¹³.

Według Joan Aicart specyficzny, indywidualny i niepowtarzalny *styl śródziemnomorski* Gaudiego oparty jest na dwóch podstawowych elementach: mistrzowskim wykorzystaniu walorów światła naturalnego charakterystycznego dla tej szerokości

⁹ T. Fischer, C.M. Herr, M.C. Burry, J.H. Frazer, op. cit.,

¹⁰ Bassegoda i Nonell, Joan (1989). *El gran Gaudí*. Ed. AUSA, Sabadell, Barcelona, “Until 1915, Gaudí indicated in all his identity documents Reus as his birthplace, but from then on he declared himself Riudoms-born. The reason for this could be that he was upset about his restoration project for the Misericordia sanctuary of Reus being rejected” s. 552.

¹¹ Shelley Wapniak, How did Antoni Gaudi use sequence, harmony, and symbolism to connect the Greek Theater with the other elements and spaces of Park Güell? LSA 461, Barcelona 2006

¹² Hensbergen, Van Gijs Gaudi. Harper Collins Publishers, 2002

¹³ J. Aicart, Gaudi and Mediterranean Culture, w: Quaderna de la Mediterrania, 15, 2011, s. 101-105

geograficznej i bogactwie form natury w świecie zwierzęcym i roślinnym i powiązaniu ich z systemem symboli mistyczno-religijnych i duchowego zakorzenienia w trzech wielkich religiach: chrześcijaństwie, judaizmie i islamie.

Gaudi był szczególnie uczulony na tradycje architektoniczne regionu, co można łatwo zauważyć już w jego pierwszym dziele: Casa Vicens, letniej rezydencji zbudowanej dla barcelońskiego producenta wyrobów ceramicznych, wyraźnie nawiązującym do *stylu Mudejar*, będącego połączeniem motywów typowych dla kultury islamskiej i chrześcijańskiej popularnego w XII-XV wieku. Casa Vicens to obok drugiej, wczesnej realizacji Gaudiego – pałacu biskupiego w Astordze, gdzie po raz pierwszy można zauważyć nieśmiałą jeszcze, ale malowniczą płynność elewacji – jedyny budynek, którego płasko uformowane elewacje pozostają rygorystycznie wertykalnie skomponowane i ozdobione bogatym, mozaikowym – arabskiego pochodzenia – wzornictwem. Casa Vicens przez niektórych uważany za manifest artystyczny katalońskiego architekta, nie jest jednak manifestem jednoznacznym, bo o ile zwiera w warstwie treściowej przesłania istotnie wyraźnie artykułujące walory przyrodnicze parceli, szczególną dbałość o maksymalne zachowanie zastanego drzewostanu i roślinności, to w warstwie formalnej ujawnia wyraźnie stonowany - daleki od dynamicznej ekspresji późniejszych dzieł – charakter budynku. Być może jest to raczej testament artystyczny zamykający po-studencki etap poszukiwań, zapowiadający antygrawitacyjną, wzniosłą, patetyczną i fantazyjną myśl twórczą ujawnioną w kolejnych kreacjach Gaudiego. Będący już na desce rysunkowej kościół Sagrada Familia, przy wciąż pozostającym w realizacji Casa Vicens to bez wątpienia zwrot Gaudiego w kierunku Art Nou-veau w unikalnym wydaniu katalońsko-śródziemnomorskim.





Ryc. 1. Casa Vicens, pierwsze chronologicznie dzieło Gaudiego o przewadze geometrycznych motywów zdobniczych

Filozofia twórcza i architektoniczna warsztatu Gaudiego wciąż jest przedmiotem badań, wobec zniszczenia jego pracowni w czasie wojny domowej i nielicznych pozostawionych przez niego tekstów i wiarygodnych wypowiedzi. Zostały one zebrane przez Isidre Puig Boada w pakiet tekstów, wypowiedzi, komentarzy i wspomnień przyjaciół i współpracowników, opublikowany w 2004 roku jako *El pensament de Gaudi. Compilacio de textos i comentaires*¹⁴. Podstawą tego pakietu jest *Manuscrito de Reus* – notatnik zapisany przez Gaudiego po jego przyjeździe do Barcelony w 1869 roku, gdzie przez cztery lata jako wolny słuchacz uczęszczał do szkoły średniej, a następnie w latach 1873-1878 studiował architekturę i zdobywał pierwsze doświadczenia zawodowe. Notatnik zawiera teksty dotyczące prywatnych relacji rodzinnych, uwagi i rozważania o „sztuce ornamentowania”, komentarze do własnych projektów, oraz relacje z profesorami ze szkoły architektury.

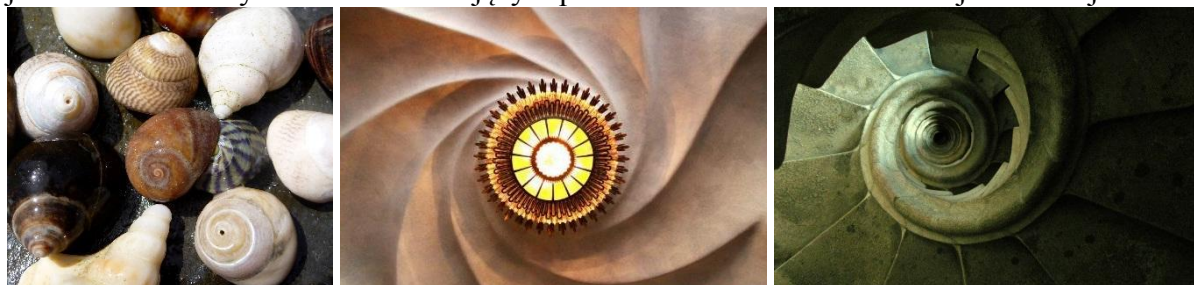
Ale Isidre Puig Boada wiele wysiłku włożył w zdobycie informacji o poglądach Antoni Gaudiego zasłyszanych lub zanotowanych przez jego przyjaciół, współpracowników, uczniów, a ilustrujących artystyczne credo Gaudiego i jego filozofię postrzegania świata poprzez pryzmat zagadnień społecznych, historyczno-kulturowych, politycznych i religijnych. Wyłania się z tych tekstów i komentarzy osobowość nadzwyczaj wrażliwego artysty głęboko osadzonego w tradycji kultury śródziemnomorskiej i czulego na piękno przyrody stron rodzinnych, ale także świadomego naturalnych walorów geograficznych i klimatycznych istotnych dla pełnego odbioru form przestrzennych i kształtów.

¹⁴ Boada I. P., *El pensament de Gaudi. Compilacio de textos i comentaires*, Dux Editorial S.L. 2004

Gaudi uważał, że prawdziwą sztukę i piękno należy poszukiwać i podziwiać w rejonie Morza Śródziemnego. Egipt, Syria, Grecja, Rzym, Hiszpania i Afryka Północna posiadają naj-lepsze warunki naturalnej ekspozycji: dzięki szerokości geograficznej dającej światło o kącie padania = 45°. Światło północne – płaskie i zenitalne – południowe deformują obiekt i utrudniają obserwację jego rzeczywistych walorów. Dlatego kultura śródziemnomorska jest tak wyczulona na bogactwo form i kształtów istniejących w naturze, a także była w stanie wykorzystać perfekcyjnie światło naturalne do celów mistycznych i religijnych¹⁵.

Drugi obok światła, nie mniej ważny aspekt odrębności kulturowej, to szczególnie rozumienie morfologicznej logiki natury. Wynikająca z jej wnikliwej obserwacji jest także apoteoza drzewa jako konstrukcji wsporczej, mocno zakorzenionej w podłożu i poprzez system rozgałęziających się konarów tworzącej przykrycie, zaś spletające się z konarami sąsiednich drzew konoidalne zielone „sklepienia” łączą się tworząc uformowanie oparte na systemie łuków łańcuchowych (odwróconych)¹⁶.

Dalej Alicart poświęca cały rozdział mistyce architektury Gaudiego, który chętnie sięga po symbole i metafory. Wyjaśnia ona, że o ile symbol oznacza społecznie akceptowaną konwencję między rzeczą materialną i jej znaczeniem w sferze niematerialnej, to metafora jest słowem lub wyrażeniem ułatwiającym porównanie lub zrozumienie tej konwencji¹⁷.



¹⁵ Boada I. P., op. cit., “Do not go to the north to seek art and beauty, this is found in the Mediterranean; from its shores – Egypt, Syria, Greece, Rome, Spain, North Africa – have come all works of art. In the North and the tropic they do not receive the light at 45 degrees, which best illuminates objects for a perfect viewing; when light is scarce or is overly zenithal, objects with inadequate lighting appear deformed; northerners, instead of the object see the ghost of the object; their heads fill with ghosts and in them fantasy predominates. In the North, literature is fantastic and Gothic architecture, too. We in the Mediterranean do not have eyes accustomed to ghosts but to images, which is why we are more imaginative than fantastic, and therefore more appropriate for the visual arts.” s. 92

¹⁶ J. Alicart, op. cit., 15, 2011, “In the search for the creation of a support, man comes across the image of the tree, which will later adapt to a proportion analogous to the human figure and to that which he himself can reach through sight. The Sagrada Família synthesises the idea of the support of the columns through the form of a tree that, effectively, rises up thanks to the interior structure of the catenary arches”. s. 103

¹⁷ J. Alicart, op. cit., “The key is the last part of the definition: a symbol represents another kind of reality through a social convention and not for another cause. In contrast, the metaphor is the “application of a word or an expression to an object or a concept [...] with the aim of suggesting a comparison (with another object or concept) and facilitating its comprehension.” In other words, in the symbol, the relation between the two realities is a social convention; in the metaphor, this relation is a fundamental and shared quality that enables our understanding”. s. 104



Ryc. 2. Muszle i ich przestrzenna spiralna powłoka będąca inspiracją dla klatek schodowych w budynkach Gaudiego, winorośl – motyw symboliczny, ale także architektoniczny i pąk roślinny jako forma organiczna zastosowana jako zwieńczenie w Casa Batllo

Takim symbolem jest u Gaudiego winorośl – źródło ożywczego owocu. Według Boada, Gaudi miał powiedzieć kiedyś: „Czy można wyobrazić sobie coś bardziej pięknego niż stół zastawiony winoroślą”¹⁸. Metafora oznacza zaś rozumienie tego stołu z winoroślą w gościnnym domu śródziemnomorskim jako miejsce spokoju i relaksu, bezpieczeństwa i wewnętrznej jedności między uczestnikami winnej uczty, zaś w kontekście religijnym oznacza ta metafora Eucharystyczne zintegrowanie z Bogiem¹⁹.

Inna ważną dla Gaudiego metaforą jest „drzewo życia” zastosowane w formie cyprysów wieńczących fasadę Narodzenia w Sagrada Familia. W antycznym Rzymie to drzewo było metaforą cesarskiego panowania nad światem; ponadto drzewo cypru utożsamiane było jako symbolizujące związek życia doczesnego i życia pośmiertnego, było wyjątkowo wytrzymałe i długotrwałe, stąd też jego charakterystyczny kształt zdobi cmentarze w basenie Morza Śródziemne-go – te zarówno islamskie, żydowskie jak i chrześcijańskie.

W końcu jeszcze jedna metafora związana z drzewem palmowym, wkomponowanym przez Gaudiego w tę samą fasadę jako dwie kolumny rozdzielające portale Wiary, Dobroczynności i Nadziei. Drzewo palmowe było nie tylko życiodajne poprzez wydawane owoce i soki, ale także jako materiał na papier, liny i sznury, było wyjątkowo wytrzymałe na suchym, pustynnym terenie, dla Rzymian oznaczało zwycięstwo, a dla chrześcijan męczeństwo; w portyku Sagrada Familia jest ono zatem czytelną metaforą męczeńskiej śmierci Chrystusa, która stała się zarazem zwycięstwem nad złem.

¹⁸ Boada I. P., *El templo de la Sagrada Familia*, Barcelona, Omega, 1952, s. 135

¹⁹ J. Aicart, op. cit., s. 104



Ryc. 3. Cyprys i palma jako motywy symboliczne, strukturalny motyw drzewa jako fraktala, portyk w Sagrada Familia ze stylizowanym drzewem palmowym i jego komputerowa geometria

Aicart kończy swój interesujący esej konkluzją charakteryzującą podstawowe cechy myśli Gaudiego: „*We can conclude by affirming that the Mediterranean is present in Gaudí’s work and way of thinking for two very clear reasons. First, because of the influence of the cultures located in the Mediterranean basin, the importance of the use of light and colour and the particular observation of nature as a consequence of its geographical and light position. Second, because of the natural metaphors that Gaudí uses*”²⁰.

Analiza gramatyki kształtów w twórczości Antoni Gaudiego, za punkt wyjścia musi przyjąć zagadnienia statyki budowli. W swoich poszukiwaniach form i kształtów występujących w naturze, Gaudí ogniskował swoją uwagę w znacznym stopniu na ich wewnętrznych strukturach, postrzegając je jako oryginalne rozwiązania powstałe w procesie tworzenia Uniwersum i będące inspiracją do poszukiwania i rozumienia sensu problemu, a następnie znajdowania roz-wiązania bez żadnych formalnych lub technicznych uprzedzeń²¹.

Gonzales i Balague analizując metodę projektowania jaką stosował Gaudí, określili ją jako funkcję dwóch zmiennych x i y , wzajemnie zależnych, gdzie wzdłuż jednej osi Gaudí rozważa możliwe do zastosowania systemy konstrukcyjne, materiały, elementy i części budowli, wzdłuż drugiej osi uwzględnia cel do jakiego zmierza: stabilność i trwałość budowli, układ funkcjonalno-przestrzenny, oczekiwane emocje formalne i artystyczne²². Autorzy ci

²⁰ J. Aicart, op. cit., s. 105

²¹ J. L. Gonzales, A. C. Balague, *Gaudí’s approach to building*, w: Proceedings of the First International Congress on Conservation History, Madrid, 20-24 January 2003, Ed. S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM, A. E. Benvenuto, COAM, F. Dragados 2003, użyte sformułowanie: “Originality arises on finding solutions by the radical analysis of problems” s. 22

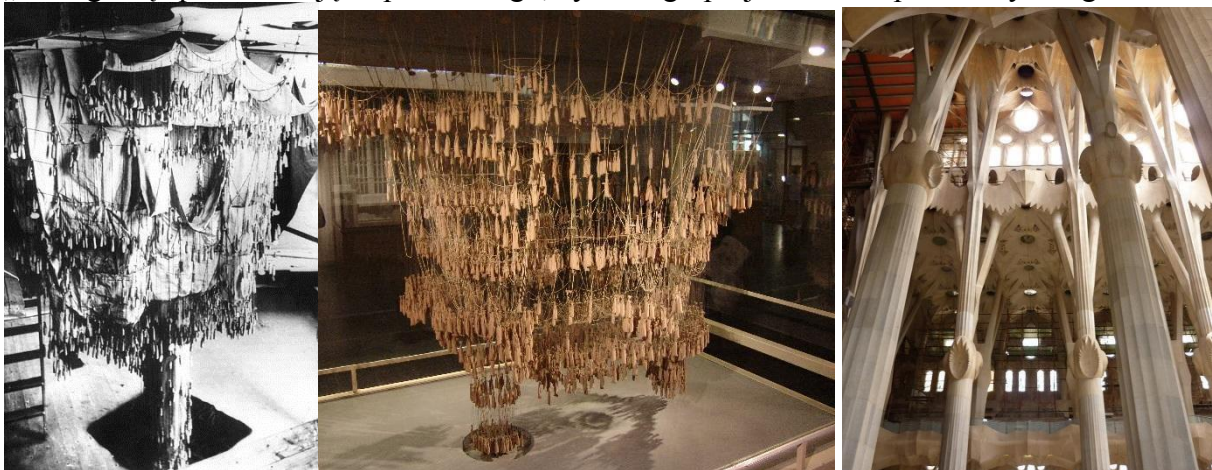
²² J. L. Gonzales, A. C. Balague, op. cit.; s. 22

zwracają także uwagę, że użyte środki i osiągnięte cele przez Gaudiego dowodzą jego głębokiego przywiązania do tradycyjnych materiałów: cegły, kamienia, drewna i zapraw wapiennych. Do wyjątków należy zastosowanie wielkiej nowości jaką przyniósł wiek XIX – stali walcowanej, ale także inny pionierski wynalazek jakim był żelbet, jest praktycznie nieobecny w dziełach Gaudiego²³.

Nie mniej jednak, bez wątpienia, choć Gaudi używa głównie tradycyjnych materiałów, czyni to w sposób oryginalny, niekonwencjonalny i nowatorski.

Jak w konkluzji publikacji piszą Gonzales i Balague, twórczość Gaudiego będąc mocno osadzoną w tradycji i pozostając zwłaszcza w wczesnej fazie pod wpływem Viollet Le Duca, nie jest w żadnej mierze próbą kontynuacji, czy parafrazowania gotyku, ani próbą jego modernizacji. Jest ona w każdym fragmencie inna i pionierska, dowodząc prawdziwego geniuszu architekta, który potrafił wykreować nowe formy, ważnie nie tylko przez swoją „nowość”, ale będące podstawą spójnej, awangardowej estetyki i nowej metodologii projektowej opartej na geometrycznej transformacji powierzchni i stereometrycznej transformacji kształtu, używanych do rewolucyjnego formowania przestrzeni, która stała się niezbywalną wartością dziedzictwa epoki²⁴.

Podstawą nowatorskiej metodologii Gaudiego było zintegrowane podejście do projektowania, polegające na równoczesnym i równoprawnym procedowaniu projektu konstrukcyjnego architektonicznego. Przyjęcie takiej metodologii było konieczne ze względu na wizjonersko-eksperymentalny i organiczny charakter systemów form i kształtów używanych przez Gaudiego do definiowania przestrzeni, a sama metoda projektowa jest „analogową” proto-wersją współczesnego, cyfrowego projektowania parametrycznego.



Ryc. 4. Archiwalne zdjęcie modelu struktury łańcuchowej i jego rekonstrukcja w Muzeum Sagrada Familia i jej zastosowanie w kościele Sagrada Familia

„Projektowanie parametryczne to uzasadnione i świadome projektowanie ... tworzenie ... scenariuszy. Budowanie modelu oznacza w tym procesie budowanie schematu danych. Modelowanie to polega na badaniu możliwości przez analizę określonych, zintegrowanych

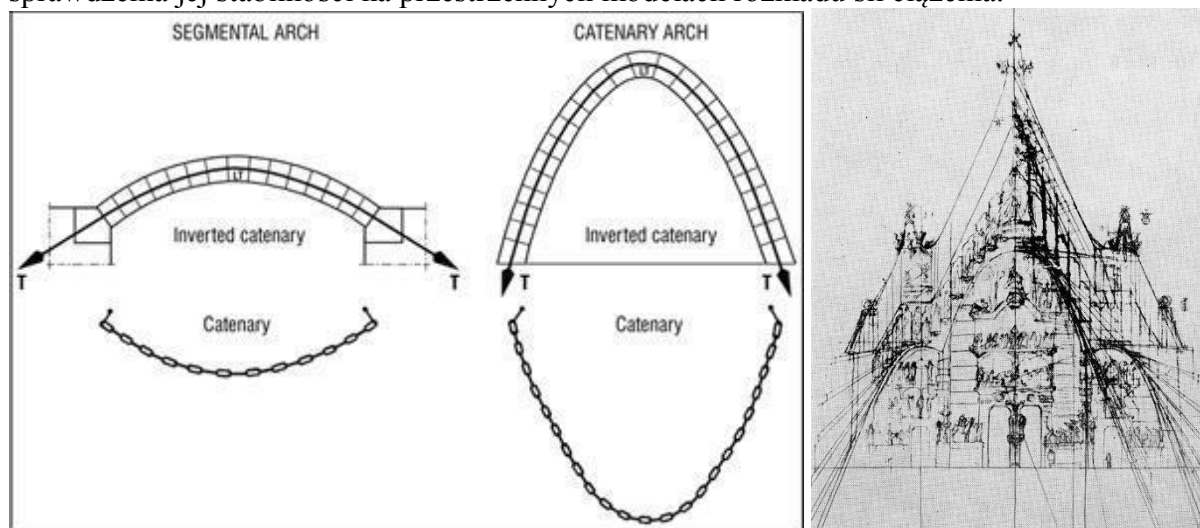
²³ Dopiero pod koniec życia, Gaudi zaprojektował żelbetowe zwieńczenie jednej z wież w Sagrada Familia

²⁴ J. L. Gonzales, A. C. Balague, op. cit.; “Unquestionably, Gaudi’s method does not even come close to surpassing the Gothic system, although this does not mean that it is either better or worse. It is, in any case, extraordinarily different. This is a key aspect. Gaudi did not surpass the Gothic but he was an unquestionable genius who created new forms in history, forms that are valid in themselves and coherent with the aesthetic revolution in which he lived in the last part of his life. He displayed an extreme creativity based on the consummately intelligent use of the geometrical properties of ruled surfaces. This is the great legacy that has been left to us in the aisles of the Sagrada Família.” s. 29

parametrów, danych oraz cech”²⁵. To co niektórzy nazywają „sprężeniem zwrotnym” w procesie poszukiwania rozwiązań jako interakcję między funkcją, formą i konstrukcją, co polega na stałym przybliżaniu efektu końcowego poruszając się do celu po krzywej Fibonaciego, u Gaudiego było właściwie stanem stałej interferencji tych elementów od momentu wzbudzenia układu (powstania zamysłu dzieła), aż do osiągnięcia wzajemnej, pełnej synchronizacji, czyli *stanu spójności*.

Jak to wyraził Santiago Huerta dzieła Gaudiego obejmowały wszystkie aspekty architek-tury: funkcję, formę i konstrukcję (dosłownie: *layout, ornamentation and stability*)²⁶, a projekt konstrukcyjny był integralną częścią projektu architektonicznego i był prowadzony równoległe z nim aż do uzyskania efektu końcowego. Gaudi preferował prace na modelach statycznych – jego szkice koncepcyjne są w gruncie rzeczy wrażeniowo podanymi impresjami, niż konkretnymi pomysłami formalnymi. Sięgał stale po graficzne analizy działania sił statycznych w ustroju budowlanym, opierając się na pionierskich pracach Roberta Hooaka (1675), który odkrył analogię w idealnym rozkładzie sił ciężenia pomiędzy kształtem krzywej zwisającego swobodnie łańcucha i jej lustrzanego odbicia w postaci parabolicznego łuku. Ten łuk stał się motywem, argumentem dla całego układu statycznego naw w Sagrada Familia, wzbogaconego o multiplikacje konstruowane zgodnie z spostrzeżeniami poczynionymi w świecie natury – układu, który po blisko stu latach został zdefiniowany jako *układ fraktalny*.

Ten wielokrotnie studiowany i rozwijany przypadek *krzywej łańcuchowej* Gaudi wykorzystał w sposób całkowicie oryginalny – rozpoczynając proces projektowania nie od tradycyjnej metody weryfikacji przyjętej wstępnie formy poprzez obliczenia statyczne, ale od sprawdzenia jej stabilności na przestrzennych modelach rozkładu sił ciężenia.



Ryc. 5. Łuk odcinkowy i paraboliczny jako odwrócona krzywa łańcuchowa i jej zastosowanie w Sagrada Familia

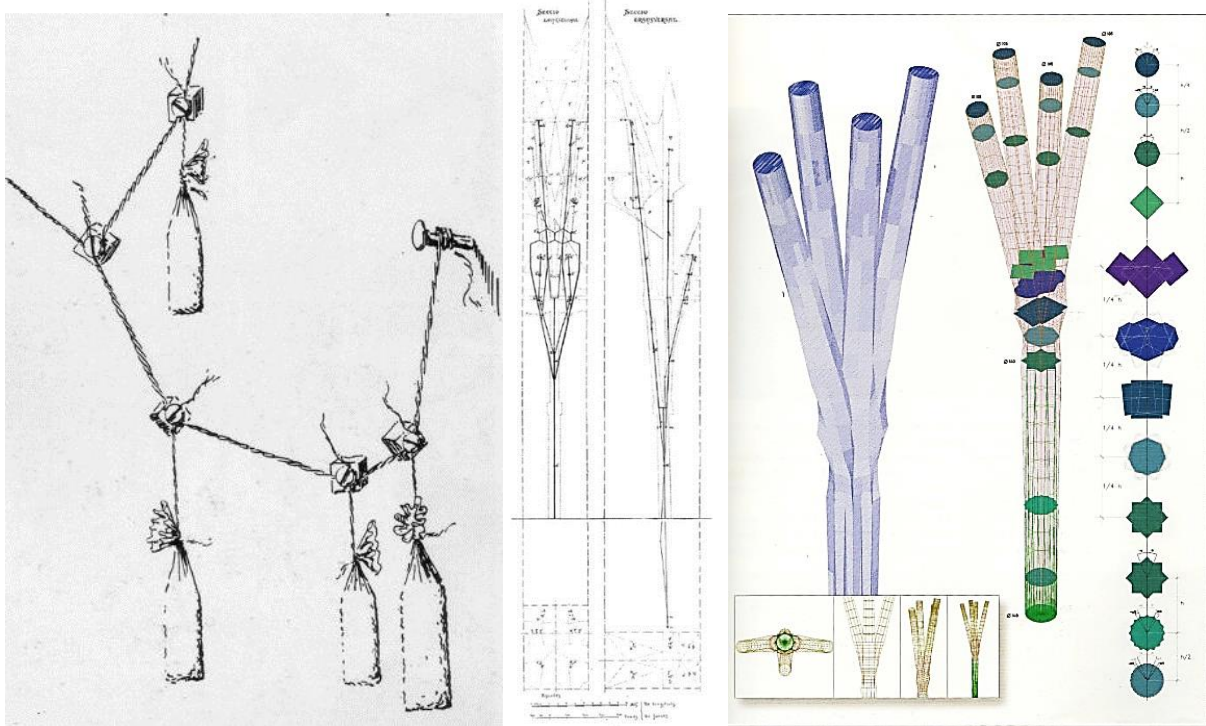
„Gaudi used the concept of catenary arches in a completely original way: to integrate the structural design in the process of architectural design. It is not a matter of verifying the

²⁵ A. A. Nawrocka, *Projektowanie parametryczne jako innowacyjna metoda w urbanistyce*, w: Zeszyty Naukowe IUPP, PK

²⁶ S. Huerta, *Structural Design in the Work of Gaudi*, Architectural Sciences Review, Volume 49.4, University of Sydney 2006; “Antoni Gaudi (1852-1926) was a Master Builder. His work covers all aspects of architecture: layout, ornamentation and stability. He also incorporates other arts: sculpture (particularly), painting, and photography. Any study of Gaudi's work must embrace this global concept of the project. ... For Gaudi, structural design was an integral part of architectural design from its initial stages. It was not restricted, as was the usual case in those days, to a mere stability check.” s. 324

stability of a certain design, it is a matter of projecting, from the start, using stable shapes. As far as we know, it is a first time that this attempt is made and exploited to its full capacity."²⁷

Dalej, Huerta prowadząc skrupulatną analizę zachowanej dokumentacji, szkiców i nota-tek Gaudiego zauważył, że pozwala ona na uchwycenie momentu przełomowego, kiedy Gaudi przeszedł od eksperymentów i obliczeń modelowych do graficznych obliczeń statycznych, które pozwalały mu już na wstępne wymiarowanie elementów. Świadczą o tym wyraźnie publikacje Gaudiego w Roczniku Związku Architektów Katalońskich datowane na 1923 rok²⁸.



Ryc. 6. Rysunek szczegółowy konstrukcji modelu łańcuchowego, graficzny wykres sił ciężenia, oraz komputerowa analiza budowy „fraktala” Gaudiego

„Gaudi abandons the funicular models and returns to graphical statics. However, it isn't the statics of funicular polygons. This is a different concept. The point is to calculate and equilibrate the loads like in a balance. Sugranes' article describes the final stage of the design of the grid of leaning columns supporting the central aisle, wall and part of the side aisles for a typical span. The shapes of the roof, vaults, walls and windows have been defined prior to the calculation stage described in the article. Sugranes does not comment on the process followed to define the shapes of the roof and vaults, walls, pediments, etc. prove the existence of a long design process, previous to the final equilibrium analysis described by Sugranes. [...] The aim is to design the shape of the supporting skeleton ("tree") of columns.”²⁹

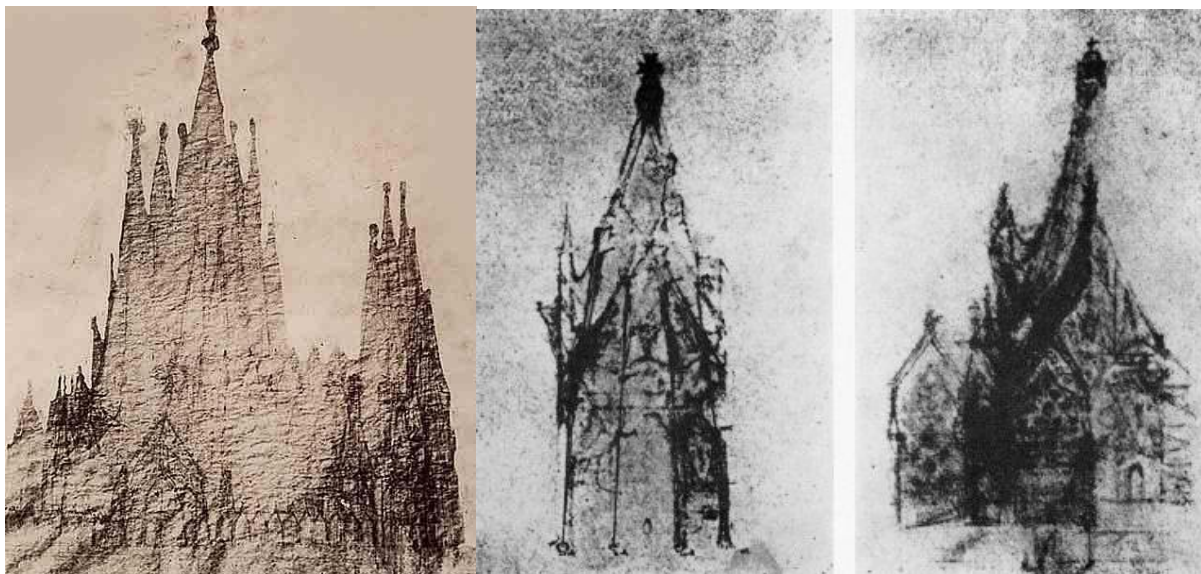
Sagrada Familia, chronologicznie jedno z pierwszych dzieł Antonio Gaudiego formalnie i treściowo wydaje się być niezaprzeczalnym credo artystycznym i ideologicznym tego niezwykłego artysty przełomu XIX i XX wieku, jedynym dziełem budowanym i

²⁷ S. Huerta, op. cit.; s. 325

²⁸ S. Huerta, op. cit.; „With regard to the structural calculations luckily, his disciple Sugranes published an article in 1923's “Anuario de la Asociacion de Arquitectos de Cataluna”, explaining the key lines of the design process and reproducing the details of the stability calculations for a typical section of the Sagrada Familia” s. 334

²⁹ S. Huerta, op. cit.; s. 334

doskonalonym poprzez liczne wprowadzone zmiany i korekty i przez blisko czterdzieści lat przez Gaudiego realizowanym, nie dokończonym w wyniku tragicznej śmierci architekta w 1926 roku.



Ryc. 7. Ideowe szkice koncepcyjne Gaudiego kościoła Sagrada Familia

To wielkie zamierzenie podjęte na zlecenie Stowarzyszenia Wielbicieli Świętego Józefa przez architekta Francisco de Paula del Villar przyniosło rozpoczęcie prac budowlanych na podstawie projektu utrzymanego w duchu neogotyckim, ale przerwano je zaledwie po roku, wskutek konfliktu Villara ze Stowarzyszeniem finansującym budowę. Prace miał kontynuować Joan Martorell, ale ten odrzucił złożoną mu propozycję rekomendując Antonio Gaudiego, który jako młody architekt pracował w zespole Villara. Gaudi, mimo zbudowania krypty, całkowicie zmienił pierwotny projekt idąc w kierunku unikalnego i nowatorskiego w owych czasach powiązania elementów Art Nouveau z organicznie formowaną architekturą oparta na prawach matematyki, fizyki i logiki oraz wzorcach czerpanych z natury. Te prawa i wzorce Gaudi postrzegał jako dane przez Stwórcę i traktował Go jako swego pierwszego i najważniejszego Klienta, dla którego praca nie może być wykonywana pod presją czasu, w pośpiechu, ale wymaga artystycznego natchnienia, rozwagi, doświadczenia i stałego poszukiwania najlepszych rozwiązań. Ten duchowo-religijny aspekt czci oddawanej Stwórcy poprzez monumentalne dzieło wznoszone przez człowieka stał się generalnym motywem nie tylko dla wielocłonowego, symetrycznego układu funkcjonalnego, ale także dla symboliki artykulacji przestrzennej budowli w formie 18 wież o różnych wysokościach, dedykowanych 12 Apostołom, 4 Ewangelistom oraz Marii i Jezusowi.

Ks. Norbert Mojżyn w publikacji omawiającej teologiczne implikacje kategorii wzniosłości jak cechuje to dzieło Gaudiego napisał, że Sagrada Familia jest dziełem, które: „...uobecnia w sobie elementy wzniosłości, pozostając spetryfikowanym świadectwem życia Gaudiego, które zostało oparte na żarliwej wierze i umiłowaniu piękna. Tacy artyści, jak Antoni Gaudi, dotykający w swej twórczości tematów transcendentnych, wyraźnie dowodzą, że rozwiązaniem dylematów egzystencjonalnych współczesnego człowieka jest osobowy Bóg, ku któremu ciąży wzniosłość sztuki...”³⁰

³⁰ Ks. N. Mojżyn, *Teologiczne implikacje kategorii wzniosłości na kanwie konsekracji kościoła Sagrada Familia w Barcelonie*, *Warszawskie Studia Teologiczne*, XXIV/2/2011, s. 381-392

Ta kategoria wzniosłości jest w twórczości Gaudiego konsekwencją skierowania „...*ducha ludzkiego ku wysokościom Boga...*”³¹.

Dla Antonio Gaudiego – twórcy architekta - oznaczało to poszukiwanie piękna i inspiracji w prawach rządzących naturą, a szczególnie w regułach matematyki i geometrii, fizyki i logiki. Wychodził on z założenia, że konstrukcja jest integralną częścią projektu architektonicznego, szczególnie w pierwszej fazie rozwoju koncepcji i nie traktował konstrukcji jako etapu niezbędnej weryfikacji pomysłu, ale jako stabilną jego podstawę³². Poszukiwał tych reguł pro-wadząc badania krzywej łańcuchowej, kreśląc łuki w swych pierwszych budowlach w opozycji do europejskiej tradycji³³, a w przypadku Sagrada Familia budował modele schematu statycznego całej budowli z zastosowaniem powiązanych węzłowo wielu krzywych łańcuchowych, wykorzystując tak skonstruowaną strukturę w wersji odwróconej.

Niestety, modele zbudowane przez Gaudiego na użytek projektu Sagrada Familia, jak i cała zawartość jego pracowni w Barcelonie: szkice, rysunki szczegółowe i dokumentacja zostały niemal w całości zniszczone w 1936 roku w czasie wojny domowej, a sama nieukończona jeszcze świątynia sprofanowana i spalona. Na podstawie zachowanych fotografii, które przedstawiają odwrócony model schematu statycznego wykonany dla kościoła w Colonia Güell, w Muzeum Sagrada Familia odtworzono model barcelońskiej świątyni.

Kościół w Colonia Güell, nie ukończony, Gaudi rozpoczął projektować w 1898 roku, a zatem już po podjęciu przez niego prac nad Sagradą Familia, ale jest bardzo prawdopodobne, że to właśnie tu zamierzał testować swój oryginalny pomysł modelowania statycznej struktury łańcuchowej przed jej zastosowaniem w budowie Sagrada Familia.

Natomiast znacznie wcześniej zainteresował się Gaudi morfologią form występujących w przyrodzie. Nie bez wpływu na te zainteresowania pozostawał rozwój nauk przyrodniczych, a zwłaszcza prace Ernesta Heinricha Haeckela, niemieckiego biologa, fizyka i filozofa, który od-krył, opisał, nazwał i usystematyzował tysiące form organicznych występujących w przyrodzie, publikując je w głośnym dziele „*Kunstformen der Natur*”. Prace Haeckela były inspiracją i dały początek rozwojowi wiedzy nazywanej topologią, a polegającej na badaniach zbiorów uporządkowanych i liczb porządkowych. Fundamentalna praca Haeckela „*General Morfology of Organismus*” została przetłumaczona na język hiszpański i opublikowana w Barcelonie w 1887 ro-ku, była bez wątpienia znana Gaudiemu i stanowiła dla niego źródło inspiracji dla fantazyjnych geometrycznie i naturalnych kształtów znanych z jego dzieł.

³¹ Opinia wyrażona przez Papieża Benedykta XVI w homilii z okazji konsekracji kościoła Sagrada Familia w Barcelonie w dniu 7.11.2010, cytat za: Ks. N. Mojżyn, op.cit.

³² S. Huerta, *Structural Design in the work of Gaudi*, w: *Architectural Science Review*, Vol. 49.4, University of Sydney, 2006, s. 324-339; “... Gaudi used the concept of catenary arches in a completely original way: to integrate the structural design in the process of architectural design. It is not a matter of verifying the stability of a certain design; it is a matter of projecting, from the start, using stable shapes. As far as we know, it is the first time that this attempt is made and exploited to its full capacity.” s. 325

³³ S. Huerta, op. cit., “From his first projects, Gaudi showed his originality and independence. In particular, he began to use systematically a type of arch not common in the western architectural tradition. Instead of using arches with a shape derived from the circle (roman, pointed, basket-handle, etc.), he used arches with non-circular shapes: parabolic, or “catenary”...” s. 324



Ryc. 8. Naturalne formy geologiczne w Kapadocji, detal kominów w Casa Batllo i smardz jako naturalna forma inspiracji

Antoni Gaudi po Witruwiuszu i Albertim jest kontynuatorem takiego pragmatycznego rozumienia architektury i zarazem pionierem projektowania parametrycznego ³⁴.

Kluczem do odczytania gramatyki kształtów charakterystycznej dla języka wypowiedzi artystycznej Gaudiego jest rozpoznanie mechanizmów przekształcania euklidesowych brył podstawowych w formy architektoniczne i detale. Mechanizm ten, polegający na przetwarzaniu form organicznych występujących w przyrodzie w oparciu o reguły matematyczno-geometryczne analizuje szeroko Cameron Brown w publikacji pt.: „Gaudi’s organic geometry” ³⁵. Według Browna Gaudi sięga po klarowne, wielościenne bryły, które intencjonalnie deformuje i nadaje im bardziej organiczne kształty. Czyni to nie tylko poprzez „zmiękczenie” powierzchni wielościanów, ale dodatkowo stosując mozaikową ich okładzinę. Brown wyszczególnia cztery proste operacje geometryczne zmiękczące płaszczyzny, krawędzie i wierzchołki bryły wyjściowej. Są to:

- a) Relax - zmiękczenie, zacieranie
- b) Sag - zaginanie, przyginanie, ściskanie
- c) Smooth - wygładzanie
- d) Twist - skręcanie

³⁴ T. Fischer, C.M. Herr, M.C. Burry, J.H. Frazer, *Tangible Interfaces to Explain Gaudi's Use of Ruled Surface Geometries*, w: ... “Architect Gaudi’s extensive use of double curved surfaces in the design of the Sagrada Familia is unique in the field of architecture and an extraordinary example of a pragmatic, yet astonishingly elegant design approach. Representing an outstanding cultural and intellectual achievement, these aesthetics and the underlying geometric concepts are consequently of great public interest yet at the same time anything but easy to understand. The challenge is to explain complex geometry to people of various levels of spatial understanding, and to do this effectively, efficiently and across cultural boundaries such as language barriers.” s.132

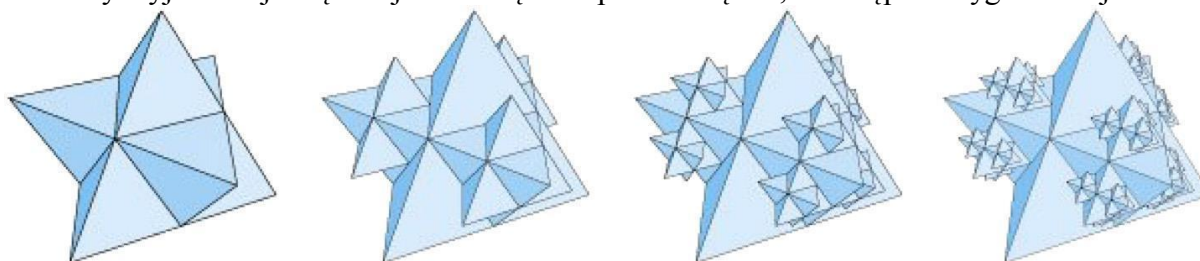
³⁵ C. Browne, *Gaudi’s organic geometry*, w: *Computers & Graphics* 32 (2008), pisze: “Gaudi’ drew inspiration from natural curves, forms and growth patterns, and incorporated these principles into his designs using a process known as organic construction in which one structural idea adds to another and transforms as it grows. His creations are bold, eccentric, and quite often breathtaking; after 100 years they still look fresh and even ahead of their time.”



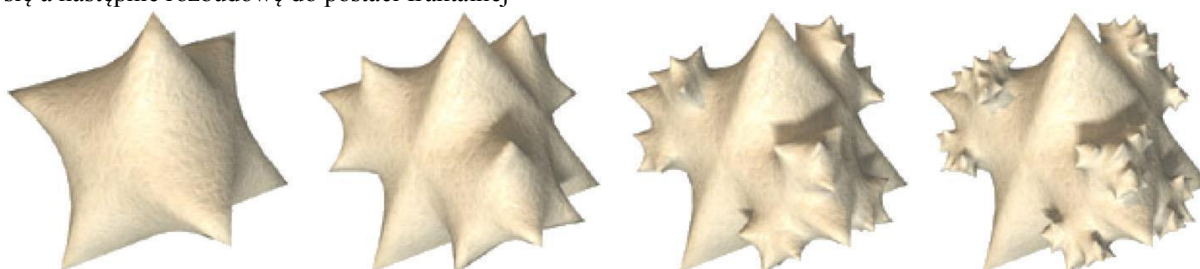
Ryc. 9. Fazy „zmiękczenia” sześcianu jako bryły podstawowej: *relax, sag, smooth, twist*

Browne na konkretnych bryłach pokazuje ten proces i odnosi go do konkretnych przypadków. Spośród wielu symulacji, warto przytoczyć proces przekształceń tetrahedronu (czterościanu foremnego) poprzez jego obrót i „samo przenikanie” się a następnie rozbudowę do struktury fraktalnej i poddanie poszczególnych faz procesowi zmiękczenia. W efekcie otrzymujemy formy dobrze znane ze zwieńczeń kościoła Sagrada Familia.

Podobny proces transformacji Brown analizuje na przykładzie monumentalnej kolumny w Parku Guell, która powstała poprzez samo przeniknięcie się dwóch wersji kolumny wyjściowej skręconej lewoskrętnie i prawoskrętnie, a następnie wygładzonej.



Ryc. 10. proces przekształceń tetrahedronu (czterościanu foremnego) poprzez jego obrót i „samo przenikanie” się a następnie rozbudowę do postaci fraktalnej



Ryc. 11. Ten sam proces przekształceń tetrahedronu z zastosowaniem technologii „zmiękczenia”

Wydaje się jednak, że Gaudi wnikał głębiej w skomplikowane relacje pomiędzy geometrią euklidesową, a formami występującymi w przyrodzie, stosując w Sagrada Familia ustroje-figury przestrzenne będące zaprzeczeniem takiej geometrii i charakteryzujące się samo-podobieństwem, a więc możliwością nieograniczonego budowania tych ustrojów-figur jako sumy identycznych fragmentów podobnych do niej w skali samo podobieństwa. Inaczej, znaczy to, że w większym fragmencie takiego ustroju-figury możemy odnaleźć identyczne, podobne, ale pomniejszone jego mutacje.

Takie struktury przestrzenne, których mnogość łatwo odnaleźć można w wielu dziełach Gaudiego, nazywane obecnie *fraktalami*, są od lat 70. ub. stulecia przedmiotem interdyscyplinarnych badań, a teoria fraktali jest częścią wchodzącą w zakres teorii chaosu³⁶.

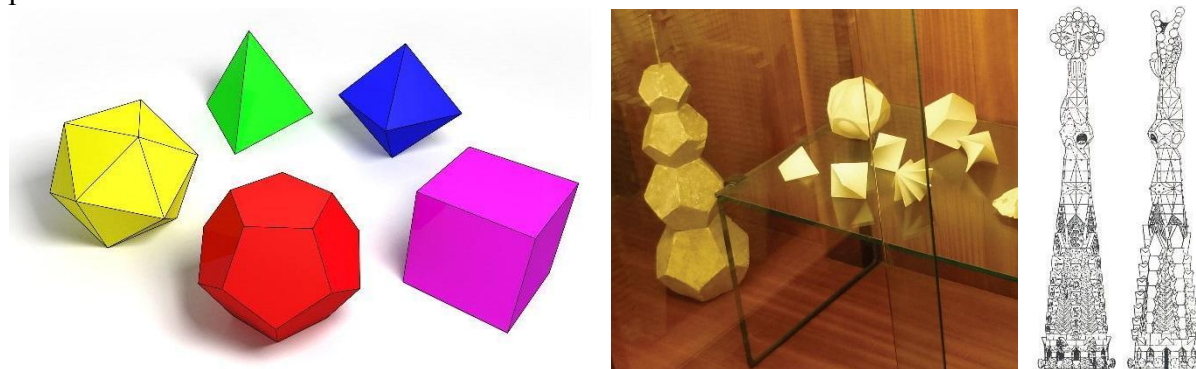
Teoria fraktali może zatem być szczególnie przydatna przy próbie odczytania i interpretacji gramatyki kształtów architektury Antonio Gaudiego.

Interesującą interpretację „fraktali” Gaudiego z kościoła Sagrada Familia, a także analizę kształtów – form wyjściowych i sposobu ich transformacji w detal architektoniczny

³⁶ B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman & Co, 1982; tenże: *The Fractalist: Memoir of a Scientific Maverick*, Pantheon Books, 2012

znajdziemy w publikacji autorstwa Marcelli Guillii Lorenzi z Uniwersytetu w Kalabrii i Mauro Francaviglia z Wydziału Matematyki Uniwersytetu w Turynie ³⁷. Autorzy na bazie wiedzy informatyczno-matematycznej konkludują generalnie, że poszukiwanie piękna przez Gaudiego opierało się na ekspresji naturalnej finezji sił ciężenia i adaptacji na jej rzecz struktur przyrodniczych, oraz na konsekwentnym stosowaniu poligonalnych kształtów geometrycznych, powierzchni helikoidalnych i paraboli. Według Autorów ten sposób budowania przestrzeni przez Gaudiego akcentował zasadniczą różnicę pomiędzy tradycyjnym klasycyzmem a patetycznie wzniosłym nowym modernizmem. Ale Autorzy rozwijają dalej analizę stylistyczną zwracając uwagę, że zwieńczenia wież zrealizowane około roku 1920 noszą wyraźne cechy kubizmu utrwalone tak w geometrycznych kształtach jak i ceramicznej kolorystyce.

Analizując dalej morfologię detalu architektonicznego Sagrada Familia na gruncie geometrii euklidesowej, ale dokonaną z pozycji informatyczno-matematycznej, zauważyli oni, że chociaż korpusy czterech centralnych wież świątyni swą formą przypominają organiczne gniazda termitów budowane przez te owady w formie smukłych, wertykalnych i wrzecionowatych termitierów, to są zwieńczone wierzchołkami w formie szpiczastych pinakli (sterczyn) zbudowanych z czystych geometrycznych form opartych na sekwencji pięciu brył platońskich ³⁸.



Ryc. 12. Zestaw pięciu platońskich brył podstawowych i ich transformacja zastosowana w zwieńczeniach Sagrada Familia

Przyjęcie przez Gaudiego sekwencji pięciu brył opisanych przez Platona, ale mających genezę euklidesową było z jednej strony wyrazem fascynacji architekta ich prostotą a zarazem nieograniczoną praktycznie możliwością kombinacji i przyrodniczą proveniencją, z drugiej zaś urzekano Go swoją symboliką, która u Platona oznaczała przypisanie każdej bryle konkretnego żywiołu: ziemi, powietrza, ognia, wody i kosmosu (Uniwersum).

Te bryły budowane są na zasadzie łączenia identycznych wielobocznych regularnych powierzchni w wielościenne bryły z narożnikami (wierzchołkami) konstruowanymi jako punkty zbiegu trzech krawędzi. Kombinacje tych brył polegające na ich zestawianiu i wzajemnym przenikaniu się dają niezwykle bogactwo form „fraktalogennych”.

Są to:

- Czterościan foremny (regularny) – *Tetrahedron* – symbol ognia
- Sześcian foremny (regularny) – *Cube, Hexahedron* – symbol ziemi
- Ośmiościan foremny (regularny) – *Octahedron* – symbol powietrza

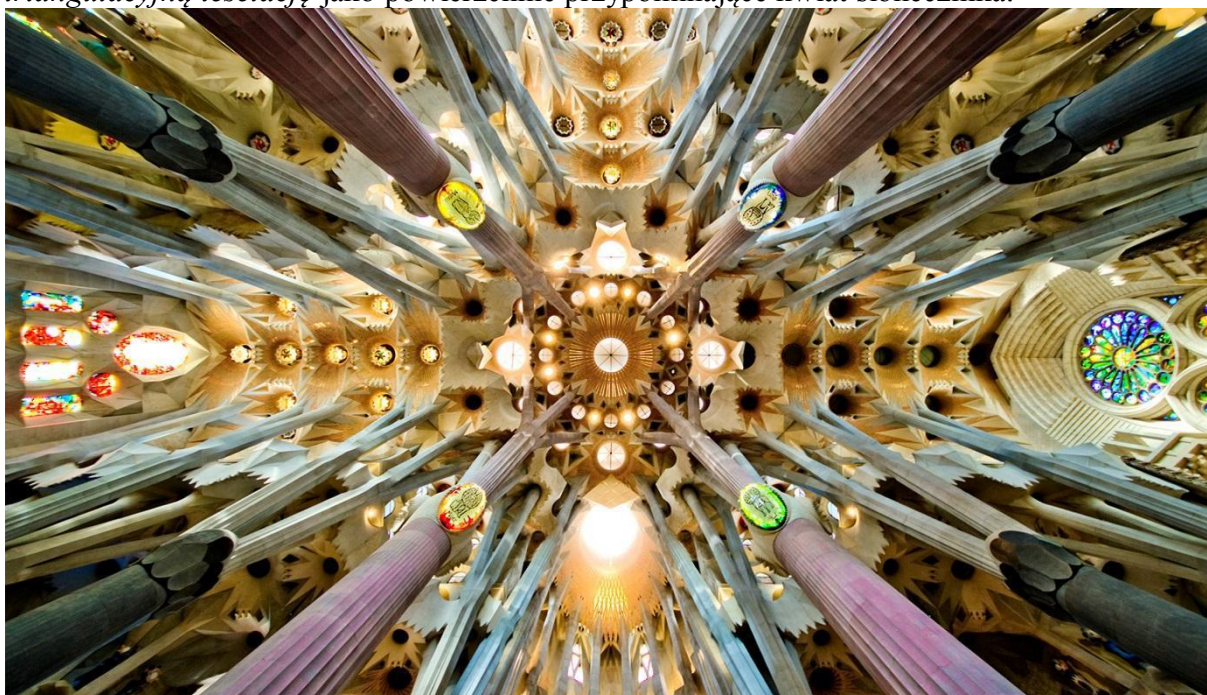
³⁷ M. G. Lorenzi, M. Francaviglia, *Art & Mathematics n Antonio Gaudi's Architecture: "La Sagrada Familia"*, w: *Aplimat - Journal of Applied Mathematics*, Volume III, nr I, 2010 s. 125-145

³⁸ M. G. Lorenzi, M. Francaviglia, op. cit.: "...These towers are terminated by cusps having a precise geometric form, covered by multicolored ceramic tiles, certainly influenced by Cubism (they were in fact finished around 1920); their pinnacles (Fig. 3) are a composition of various intertwined geometrical elements (among which Platonic Solids abound: triangular pyramids, cubes, octahedral; but also spheres and other figures;..." s. 130.

- Dwunastościan foremny (regularny) – *Dodecahedron* – symbol Uniwersum
- Dwudziestościan foremny (regularny) – *Icosahedron* – symbol wody

Sekwencja tych brył jest nie tylko charakterystyczna dla Sagrada Familia, ale można ją odnieść do innych dzieł katalońskiego architekta i stwierdzić, że może ona być uważana jako czytelna, podstawowa gramatyka kształtów architektury Antonio Gaudiego. Jej morfologia to owe pięć brył i ich pochodne, składnia - to artystyczna kombinacja form, które można dzięki temu wygenerować i ułożyć w ciągi sekwencyjne.

U Gaudiego ten ciąg sekwencyjny został także wykorzystany i przekształcony są w „fraktalogenne” części składowe odwróconej struktury łańcuchowej, na której oparta została statyka naw centralnych świątyni. Architekt skonstruował je na modularnych kolumnach w kształcie rozgałęziających się smukłych pni drzew, z których wyrastają wiązki konarów dźwigających sklepienie. Jest ono złożone z centrycznych płatów ukształtowanych poprzez *triangulacyjną teselację* jako powierzchnie przypominające kwiat słonecznika.



Ryc. 13. modularne kolumny nawy w Sagrada Familia w kształcie rozgałęziających się smukłych pni drzew, z których wyrastają wiązki konarów dźwigających sklepienie

Ale szczególnie istotna jest całkowicie nowatorska *protofraktalna* filozofia budowy kolumn dynamicznie zmieniająca i rozwijająca profil poprzeczny ich trzonów (pni) i wiązki smukłych prętowych wsporników (konarów), który jest nie tylko przekształcany z pięcioboku foremnego, poprzez symetryczną jego mutację – w wielobok eliptyczny i ostatecznie w okrąg, ale także ten zmienny profil poddany jest prawostronnym i lewostronnym rotacjom.

W Sagrada Familia Gaudi uzyskał w ten sposób efekt „naturalnej fraktalnej struktury” wyprzedzając epokę skutecznym zastosowaniem budowlanego modelu takiej struktury, która naukowo rozpoznana została blisko sto lat później. Ta niezwykła wyobraźnia, ale także zdolność obserwacji przyrody pozwoliła Gaudiemu na przeniesienie odkrytych w naturze węzłów łączących pień drzewa z konarami poprzez zastosowanie zasad geometrii euklidesowej do architektonicznego systemu kolumn rozbudowanych w ich węzle – kapitelu – w wiązkę subtelnie uformowanych prętów podpierających siatkę połączeń sklepiennych ³⁹.

³⁹ M. G. Lorenzi, M. Francaviglia, op. cit.: “... This clever system not only generates rather interesting geometrical shapes and symmetries, but also allows to mimic an astonishing continuity between lines and surfaces of different columns, exactly as it happens in Nature when passing from the trunk to the stakes of a tree

Jeśli przyjmiemy, że Gaudi odrzucając bezpośrednie inspiracje XIX wiecznym neogotykiem, czego dowodem jest zaniechanie kontynuacji wizji Sagrada Familia pozostawionej przez swojego poprzednika, to bez wątplenia jego świątynia boża wyraźnie czerpie ze średniowiecznych katedr takie walory jak wzniosłość i mistycyzm.

Na cechę wzniosłości zwrócił uwagę cytowany już ks. Mojżyn, powołując się na Dziamskiego, który uważa, że „Sztuka musi zbliżyć się do tego, co nieokreślone, niewyraźne, co określa się mianem – wzniosłe”⁴⁰, ale rozwija ten wątek dodając, że „Wzniosłość wymaga od człowieka, aby zaakceptował tę kategorię estetyczną, jako określony stan ludzkiej egzystencji poszukującej sensu i zrozumienia. Sens naszej egzystencji polega na dążeniu do realizacji projektów egzystencjalnych – tego, czym jeszcze nie jesteśmy, ale do czego podążamy”⁴¹.

Dążenie do bycia lepszym niż się jest to z jednej strony prawo artysty, ale z drugiej strony obowiązek chrześcijanina. To dążenie stale towarzyszy Gaudiemu, przy akcentowaniu pokory i skromności. Kiedy w 1915 roku Gaudi oprowadzał po budowie nuncjusza apostołskiego, który nazwał architekta katalońskiego poetą, ten miał odpowiedzieć „Któż nie czułby się poetą u boku Eklezji!”⁴².

Mistycyzm wyrażony poprzez symbolikę i tajemniczość jest wg Elżbiety Stróżeckiej obce współczesnemu człowiekowi żyjącemu w rzeczywistości zdesakralizowanej⁴³. Miarą średniowiecznego mistycyzmu było światło, miara liczba i waga. Podążając za słowami Chrystusa: „Ja jestem światłością świata, kto za mną idzie nie będzie żył w ciemnościach, lecz będzie miał światłość żywota” (J 8,12), opat Sugar z Saint-Denis wymagał od budowniczych, aby światło przelewało się do wnętrza świątyni, nadawało jej cech transcendentnych i było „niezwykłym łącznikiem między Niebem i Ziemią”⁴⁴. Stróżecka tak charakteryzuje mistycyzm średnio-wiecznych katedr wyrażony „matematyczną kontemplacją Uniwersum”: „Każda katedra gotycka jako obiekt sakralny stawiana była zawsze na podobieństwo całego kosmosu. Stanowiła jego odbicie strukturalne w sensie ładu, jedności oraz wzajemnego odniesienia elementów. Porządek ukryty w matematycznych formach architektonicznych środków najlepiej zapewniał osiągnięcie tego celu. Dlatego cała katedra jest znakomitym przykładem harmonii liczb. „Wszystko zostało urządzone według Liczby” – mówił Pitagoras (wg Jamblicha)⁴⁵.

Toteż mistyka wnętrza Sagrada Familia całkowicie spełnia wymagania opata Sugara, a „matematyczna kontemplacja Uniwersum” jest nie tylko potwierdzona pitagorejsko-euklidesową geometrią, która posługiwał się Bóg Geometra opisany przez św. Augustyna, a w jego imieniu skromny i pokorny architekt, ale także tajemniczą symboliką liczb.

(Fig. 9). A fully “natural fractal structure”, in fact, much in the aforementioned spirit of imitation of Nature. It is impressive how Gaudi was in fact able to obtain such a naturalistic structure by a clever use of Euclidean Geometry, with a fractal process of self-similarity and self reproduction (Fig. 10)...” s. 134

⁴⁰ G. Dziamski, *Postmodernizm wobec kryzysu estetyki współczesnej*, Poznań 1996

⁴¹ Ks. N. Mojżyn, op. cit., s. 390

⁴² Cyt. wg J. Bassegoda Nonell, *“Das Religiöse und Mistische”*, w: *Antonio Gaudi, Kat. Wyst. Barcelona – München*, 1986. Zob. G. FAHR-BECKER, *Secesja*, dz. cyt., 207.

⁴³ E. Stróżecka, *Od ciemności do światła – mistyczna geometria gotyckich katedr*, w: *Teksty Konferencji MathPAD 2012, UMK, Toruń, 22-25 Sierpnia 2012*

⁴⁴ E. Stróżecka, op. cit., s. 2

⁴⁵ E. Stróżecka, op. cit., s. 3



Ryc. 14. Operowanie światłem naturalnym dla uzyskania nastroju mistycznego i kwadrat magiczny na fasadzie kościoła Sagrada Familia

Oto dlaczego Gaudi sięgnął też po motyw tzw. *kwadratu magicznego*, który był znany już w starożytnych Chinach i Indiach, gdzie traktowany był jako amulet lub talizman przynoszący szczęście. W Chinach był także używany jako reguła w projektowaniu obiektów architektonicznych wg której rozplanowano założenie Pałacu Cesarskiego w Pekinie. Zasada *kwadratu magicznego* na takim ułożeniu liczb, aby suma wierszy, kolumn i przekątnych dawała zawsze taką samą wartość:

$$S = n(n^2 + 1) / 2$$

Motyw kwadratu magicznego został przez Gaudiego wkomponowany w fasadę Męki Pańskiej, gdzie obok rzeźbionej sceny pocałunku Judasza znalazła się 16 polowa tablica (4X4) z liczbami, których suma w każdym kierunku daje wartość 33, wiek w którym Chrystus został ukrzyżowany. Ale Lorenzi i Francaviglia wskazują jednak, że *kwadrat magiczny* Gaudiego jest w gruncie rzeczy pseudo kwadratem magicznym, ponieważ jest błędnie skorygowanym kwadratem Durerera, w którym suma liczb zawsze daje wartość 33⁴⁶.

1	14	15	4	1	14	14	4
12	7	6	9	11	7	6	9
8	11	10	5	8	10	10	5
13	2	3	16	13	2	3	15

Badacze ci zwracają uwagę na jeszcze jedną niezwykłość pseudo magicznego kwadratu Gaudiego: oto suma dwóch powtarzanych liczb (14 + 14 + 10 + 10) daje wartość 48, co można interpretować jako sumę liczb oznaczających kolejne miejsca lokalizacji liter INRI w alfabecie łacińskim.

Konkluzje

Reasumując, w odczytywaniu gramatyki kształtów Gaudiego należy brać pod uwagę silny pierwiastek religijny budujący mistykę i wzniosłość jego architektury, zwłaszcza sakralnej, oraz szczególne zainteresowanie kształtami i formami występującymi w przyrodzie. Tu należy wyraźnie podkreślić, że nie jest to zainteresowanie powierzchowne, czy artystyczna epatacja plastyką, kolorem, czy różnorodnością form, ale mająca podłoże naukowe głęboka ich analiza pod kątem morfologicznym, strukturalnym, czy statycznym. Właśnie na ten aspekt gramatyki kształtów Gaudiego zwrócili uwagę naukowcy z Politechniki w Turynie Iasef Md

⁴⁶ M. G. Lorenzi, M. Francaviglia, op. cit.: "...It has been argued that Subirachis choose this particular square (there are in fact other possibilities) since the sum of the two repeated numbers is 48 (namely, 10+10+14+14), that in the Latin alphabet is also the sum of the places of the four letters I.N.R.I. (namely, 48 = 9+13+17+9). The same sum 33 can be obtained in several other ways..." s.

Rian i Mario Sassone ⁴⁷, powołując się na wypowiedź samego Gaudiego, który postrzegał drzewo i szkielet ludzki jako najbardziej dojrzałe ustroje konstrukcyjne ⁴⁸, dodajmy odporne na i zdolne do prze-noszenia zmiennych obciążeń dynamicznych. Rian i Sassone podkreślają ponadto, że Gaudi doprowadził do perfekcji swoją koncepcję strukturalną oparta nie tylko na jednostkowym segmencie statycznym modelowanym przestrzennie na wzór fraktali, a następnie potwierdzanym obliczeniami przy pomocy „grafiki statycznej” (*graphic statics*) ⁴⁹, ale rozwija ten ustrój w modularny, powtarzalny zintegrowany układ pochyłonych kolumn spiętych rozgałęzionymi konarami stanowiącymi szkielet dla hiperboloidalnie uformowanego baldachimu – sklepienia ⁵⁰ oraz powiązanego w podziemiach fundamentowym systemem „korzennym” konstrukcji, który należy zaliczyć do najwcześniejszych i najwspanialszych przykładów *strukturalnej dendroformy* dającej początek nowoczesnym konstrukcjom organicznym w architekturze XX wieku ⁵¹.

Kolejnym etapem twórczym charakterystycznym dla warsztatu projektowego Gaudiego było wykorzystanie geometria euklidesowej i podstawowych brył platońskich poddawanych procesom multiplikacji, transformacji i przenikania, a poprzez zastosowanie technologii rozciągania i skręcania, tworzenie sprawdzonych w przyrodzie struktur, którym niemal wiek później nauka II połowy XX wieku nadała nazwę fraktali, a pionierzy nowoczesnej architektury formy organiczne programowo wykorzystywani w nowatorskich koncepcjach przestrzennych ⁵².

Problem gramatyki kształtów i jej współczesne zastosowania w teorii i projektowaniu architektonicznym, ale także dla celów analizy dzieł historycznych szeroko relacjonują Bojan Tepavčević i Vesna Stojaković, ukazując równocześnie aktualne, rozgałęzione możliwości jej aplikacji ⁵³. Zwłaszcza szczególnie nas interesujący może być aspekt aplikacji gramatyki

⁴⁷ I.M. Rian, S. Sassone, *Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview*, w: *Frontiers of Architectural Research* (2014) 3, 298–323 “His quest for finding his own architectural language was heavily inspired by the structural characters of natural forms. His life long study of the organic structural system from nature has translated into his use of ruled geometrical forms such as a cone, helicoid, hyperboloid and hyperbolic paraboloid to design the vaults, and the entire structural system of the Chappels and Cathedral, like tree trunks with branches.”

⁴⁸ I.M. Rian, S. Sassone, op. cit.; s. 306-307

⁴⁹ I.M. Rian, S. Sassone, op. cit.: “The principal idea behind Gaudi’s use of the fractal-like tree column can be referred to as the center of force method that can be analyzed by ‘graphic statics’. During his time, ‘graphic statics’ was an advanced tool that allowed the designers to take form sand forces into account simultaneously. Antonio Gaudi, famously known for the physical scale modeling method for structural calculations, also used ‘graphic statics’ as a form-finding tool for visualizing the stress equilibrium in designing some of his signature style structures in the late 19th century.”, s. 308

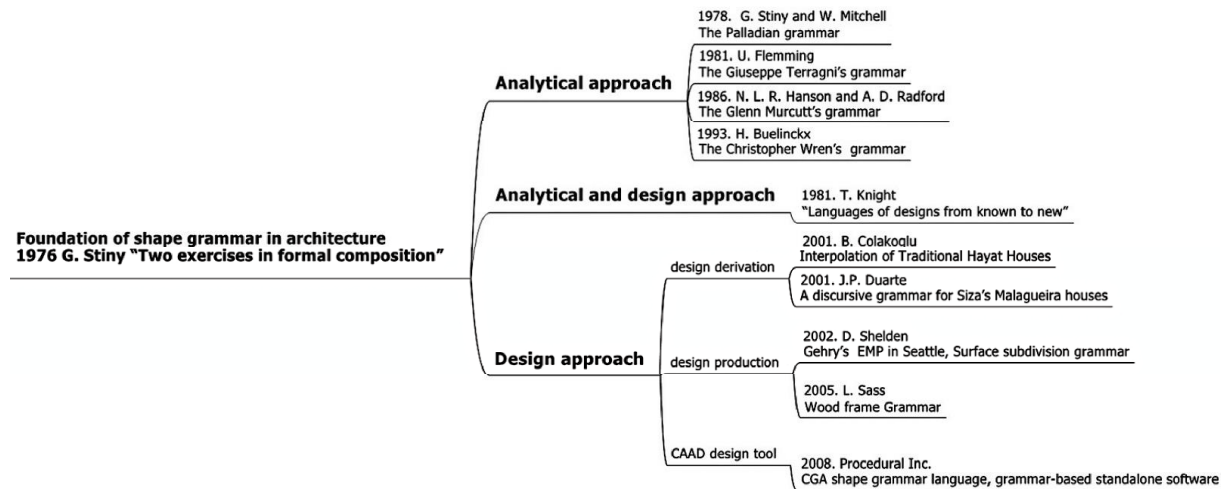
⁵⁰ Obecnie taka struktura posiada nazwę *fractal*, por. także: C.A.J. Gomez Gómez, *Gaudí: Geometria, Estructura i Construcció*, en Gaudí 2002. Miscelània, s.144.

⁵¹ I.M. Rian, S. Sassone, op. cit.: “Gaudi’s structural dendriforms are one of the earliest and finest examples of making tree like concrete - made branching structures inspired by nature. When in early 20th century the trend of structural minimalism was becoming popular, Gaudi’s tree like sculpted structural supports, in contrast, were stunningly appealing and uniquely special in the field of architecture.: s. 308

⁵² J. Barrallo, S. Sánchez-Beitia, 2011. *The geometry of organic architecture: the works of Eduardo Torroja, Felix Candela and Miguel Fisac*, Bridges 2011: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. Tessellations Publishing, 65–72. The University of Melbourne, Melbourne, 2011

⁵³ B. Tepavčević V. Stojaković, *Shape Grammar in Contemporary Architectural Theory and Design*, w: FACTA UNIVERSITATIS, Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 10, No 2, 2012, s. 169 – 178, autorzy zauważają, że początkowe małe zainteresowanie gramatyką kształtów zmieniło się wobec nowych, potencjalnie szerokiego obszaru zainteresowań: „However, many shape grammar related projects of that time, including the previously described example, imply great potential in the field of architectural heritage, design and theory. In architecture shape grammar applications have been used for the purposes of synthesis and analysis and as a combination of both approaches. ... Until the last decade of the twentieth century, application of shape grammar was developing as a tool for analysis. Through its first applications, shape grammars became an

kształtów jako narzędzia analitycznego do badań nad historią i teorią architektury, a znakomitym przykładem mogą być badania Stiny’ego i Mitchella nad „gramatyką palladiańską”⁵⁴. Jak sądzę, metoda Stiny’ego i Mitchella może być wykorzystana, bądź zmodyfikowana na rzecz opracowania gramatyki kształtów architektury Antonio Gaudiego.



Ryc. 15. Schemat rozwoju ewolucyjnego zastosowań gramatyki kształtów w architekturze

LITERATURA (wybór)

1. Aicart, J. *Gaudi and Mediterranean Culture*, w: Quaderna de la Mediterrania, 15, 2011
2. Bassegoda, J. *El gran Gaudí* (in Spanish). Barcelona: Sabadell, 1989
3. Bonet i Armengol, J. *The essential Gaudí: the geometric modulation of the Church of the Sagrada Familia*. Translated by Mark Burry. Barcelona: Pòrtic 2001
4. Boada I. P., *El templo de la Sagrada Familia*, Barcelona, Omega, 1952,
5. Boada I. P., *El pensament de Gaudí. Compilacio de textos i comentaires*, Dux Editorial S.L. 2004
6. Browne, C. *Gaudi's organic geometry*, w: Computers & Graphics 32 2008

established paradigm in the theory of computational design.” s. 171-172

⁵⁴ B. Tepavčević V. Stojaković, op. cit.; powołują się na pracę wydaną w 1978 roku, a poświęconą analizie gramatyki kształtów w architekturze Andrea Palladio: „Stiny and Mitchell published the work “The Palladian grammar” that initiated an ambitious and influential research on how shape grammar can be used in a study of an architectural style. They proposed a method based on parametric shape grammar for generating ground plans of Palladio's villas as a definition of the Palladian style. Specifying the shape grammar rules, they recast parts of Palladio's system of proportion and “architectural language” in a modern, “generative form”. Rules defined in “Palladian Grammar” were based on examples of villa plans drawn in the Quattro Libri dell'Architettura by Andrea Palladio in 1570. Mitchell and Stiny followed Wittkower's opinion about ground plans as the most distinguishing feature of Palladio's villa, and that is why other aspects of Palladio's architectural system, such as decorative elements or villa facades, are not considered in their work. As Stiny and Mitchell noted, the definition of Palladian style by use of the parametric shape grammar, initiated other issues and questions of aesthetics and historical interest to be investigated. Grammar, for example, can be used to distinguish stylistic features in neo-Palladian movements that are canonical in Palladian sense from those that diverge from Palladio's standard architectural usage.”, por. także: G. Stiny and W. J. Mitchell, “*The Palladian grammar*”, w: Environment and Planning B 5 1978, s. 5-18.

7. Huerta, S. *Structural Design in the work of Gaudi*, w: *Architectural Science Review*, Vol. 49.4,
8. Lorenzi, M. G., Francaviglia, M. *Art & Mathematics in Antonio Gaudi's Architecture: "La Sagrada Familia"*, w: *Aplimat - Journal of Applied Mathematics*, Volume III, nr I, 2010
University of Sydney, 2006
9. Martinell, C. *Gaudí: his life, his theories, his work*. Translated by Judith Rohrer.
Cambridge, Massachusetts: The MIT Press 1975
10. Ks. Mojżyn, N. *Teologiczne implikacje kategorii wzniosłości na kanwie konsekracji kościoła Sagrada Familia w Barcelonie*, *Warszawskie Studia Teologiczne*, XXIV/2/2011
11. Puig i Boada, I. *El pensament de Gaudí* (in Catalan). Barcelona: Dux Editorial, S. L. 2004
12. Tarragona, J. M. *Antoni Gaudí, un arquitecto genial* (in Spanish). Barcelona: Casals 2011
13. Zerbst, R. *Gaudí, 1852–1926: Antoni Gaudí i Cornet: a life devoted to architecture*.
Cologne, Germany: Taschen 2002

**5. Badanie możliwości odwzorowania w sieciach neuronowych dwóch procesów:
modelowania kreatywności oraz ewolucji uzdolnień Antonio Gaudiego.**

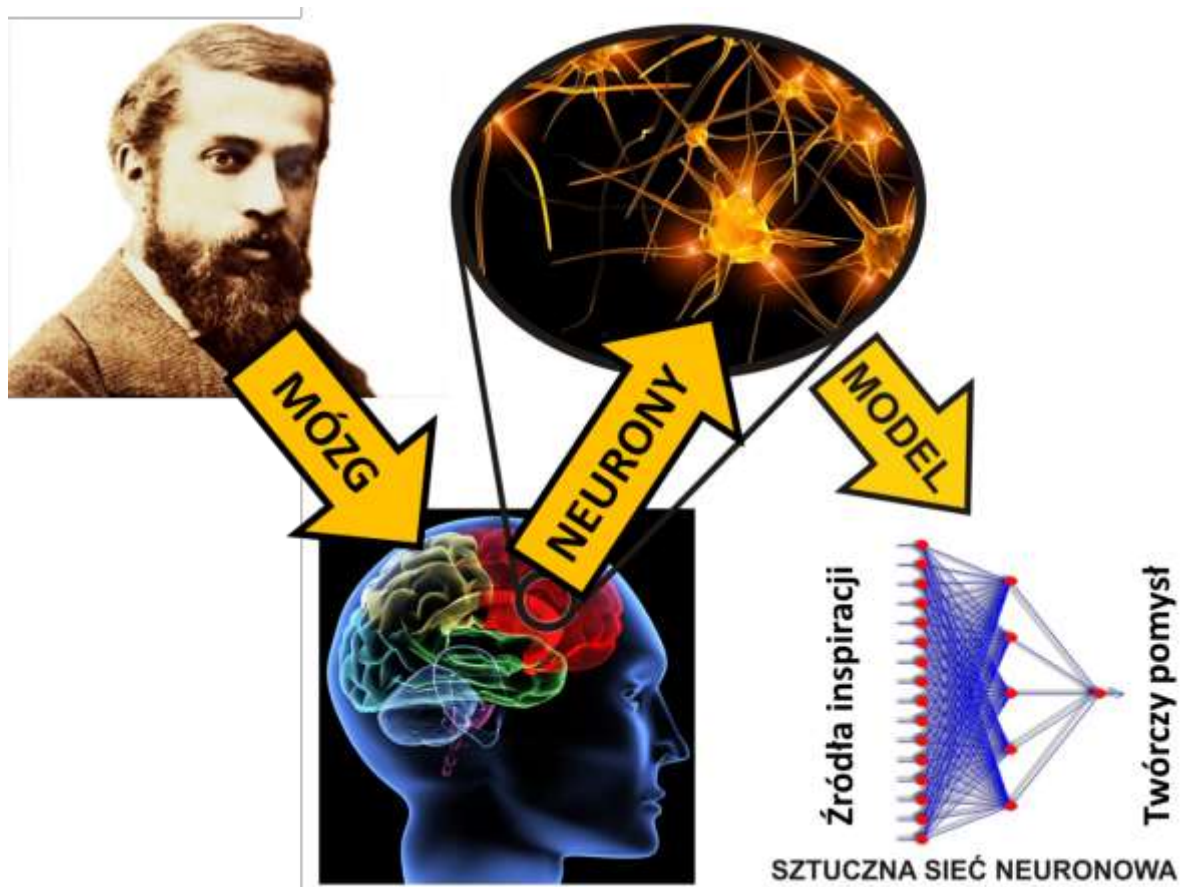
Projekt „Wirtualny Gaudi” – badanie możliwości odwzorowania w sieciach neuronowych dwóch procesów: modelowania kreatywności oraz ewolucji uzdolnień

Prezentowane opracowanie przedstawia wstępne studium możliwości uzyskania neuronowego modelu procesów: **modelowania kreatywności** oraz **ewolucji uzdolnień**. Zgodnie z koncepcją pomysłodawcy projektu, prof. Tadeusza Szuby, połączenie tych dwóch procesów może doprowadzić do tego, że odpowiednio uformowana sieć neuronowa stanie się generatorem nowych propozycji (na przykład architektonicznych) oraz że na drodze procesów uczenia sieć taka będzie swoje możliwości w wyżej wymienionym zakresie doskonaliła i rozwijała, co będzie mogło stanowić swoisty model ewolucji uzdolnień.

Autor tego opracowania podjął próbę zweryfikowania tych hipotez.

1. Wprowadzenie

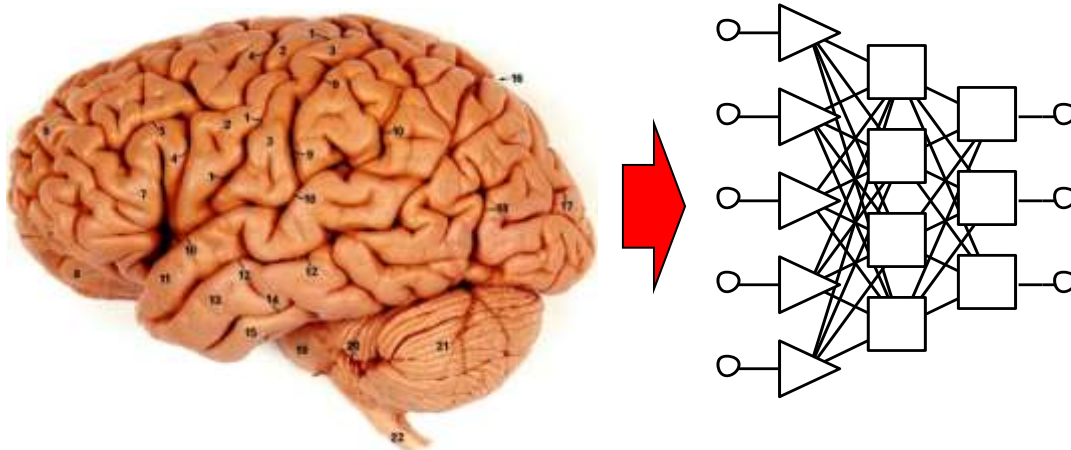
Pomysł, na którym oparty jest ten artykuł, da się streścić w następującym schemacie (Rys. 1).



Rys. 1. Droga rozumowania przyjęta w tym opracowaniu

Schemat rozumowania jest następujący: Tajemnicę intelektu i twórczego talentu Gaudiego wiążemy wyłącznie z jego **mózgiem**. Na podstawie współczesnej wiedzy to założenie jest ze wszech miar uzasadnione, chociaż z pewnością znajdują się oponenti twierdzący, że jest to daleko posunięty redukcjonizm. Następnie nie mogąc zbadać całego mózgu (o czym będzie mowa dalej) – wybieramy tylko fragment tego mózgu i obserwujemy, że budują go połączone w misterną sieć komórki nerwowe, tak zwane **neurony**. Biorąc za podstawę opis budowy tych neuronów, zasad ich działania oraz struktury połączeń uzyskujemy bardzo uproszczony **model** tych struktur neuronowych w postaci tak zwanej **sztucznej sieci neuronowej**. Będziemy się starali znaleźć w tej sieci takie formy jej zachowania, które przekształcają różne źródła inspiracji (obserwacje przyrody, rozważania religijne, uwarunkowania związane ze statyką budowli itd.) na twórczy pomysł, będący źródłem nowatorskiego rozwiązania architektonicznego.

Centralnym elementem tych rozważań będzie model mózgu w postaci sieci neuronowej (rys. 2) i temu elementowi poświęcimy teraz nieco uwagi. Założenie jest nieco karkołomne: Chodzi o to, żeby zamiast badać niesłychanie skomplikowany twór, jakim jest ludzki mózg – w szczególności mózg twórcy, a konkretnie mózg Gaudiego - prowadzić pewne badania na jego KRAŃCOWO uproszczonym modelu, jakim jest sieć neuronowa.



Rys. 2. W tym artykule korzystamy z modelu mózgu w postaci sieci neuronowej (źródło rysunku mózgu: <http://www.wgabinecie.pl/others/image/brain2.jpg>)

Na pozór brzmi to niedorzecznie: Jak coś tak prymitywnego, jak sieć neuronowa, może dostarczać użytecznych informacji o czymś tak niesłychanie złożonym, jak ludzki mózg?!

Spróbujemy jednak pokazać, że **wybrane** wyniki uzyskiwane w sieciach neuronowych mają ciekawą interpretację właśnie w kontekście właściwości mózgu i zasad jego działania. Okoliczność ta stwarza szansę, że badając bardzo prosty system (sieć neuronową) zbliżymy się do **zrozumienia** procesów, zjawisk i zależności zachodzących w rzeczywistym biologicznym mózgu. A tego **zrozumienia** bardzo potrzebujemy, być może nawet teraz (w sytuacji, gdy dostępna jest ogromna liczba szczegółowych wyników badań mózgu) – bardziej niż kiedykolwiek wcześniej!

Podstawowe dane o mózgu zebrano na rysunku 3. Widać, że jest to twór biologiczny o naprawdę imponującym stopniu złożoności.

WAGA 1250 –1400 GRAMÓW
LICZBA NEURONÓW 100 MLD
DZIENNY UBYTEK NEURONÓW 10 TYS.
LICZBA POŁĄCZEŃ 100 TYS. MLD

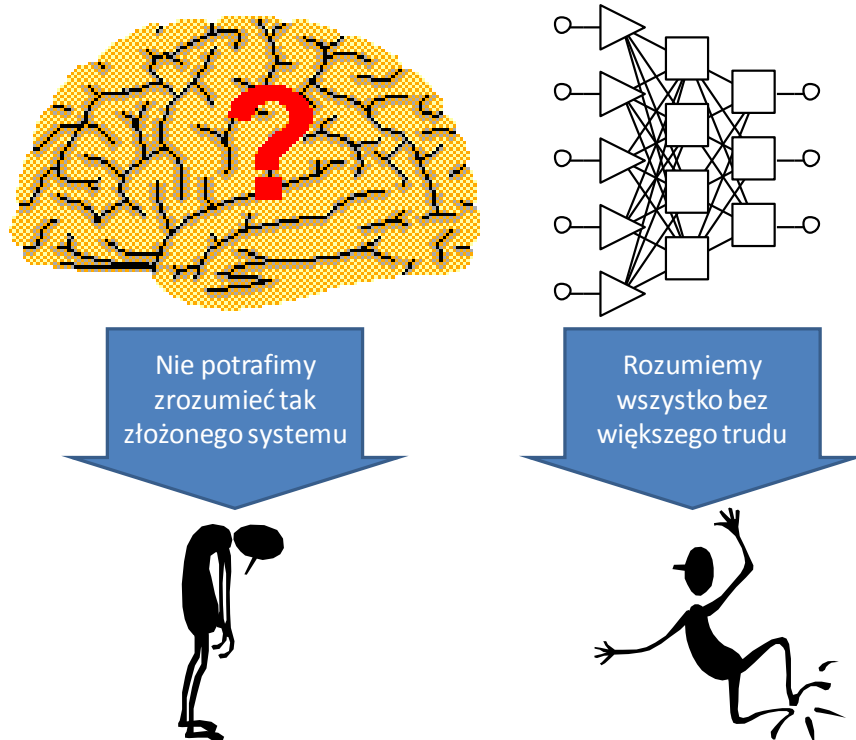


Wypreparowany mózg

SZEROKOŚĆ SYNAPS
 20-25 NANOMETRÓW
 (1/600 WŁOSA)
LICZBA NEURYTÓW
ŁĄCZĄCA OBE PÓLKULE
 300 MLN
ZUŻYCIE GŁUKOZY
 8-10 RAZY WIĘCEJ NIŻ
 INNE NARZĄDY
ZUŻYCIE TLENU 20 %
INTENSYWNOŚĆ
UKRWIENIA 750 ML/MIN
ZUŻYCIE ENERGII 10 WAT

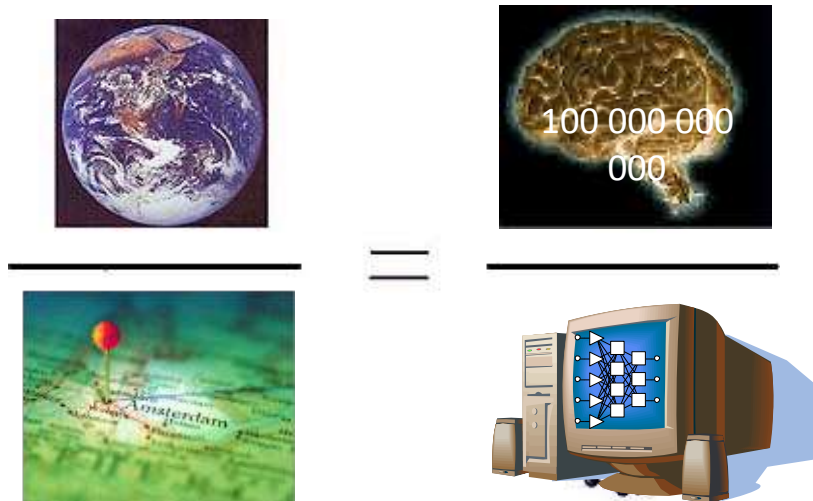
Rys. 3. Wybrane dane na temat biologicznego mózgu

Rozważana dalej jako model mózgu sieć neuronowa jest w odróżnieniu od niego bardzo prosta. Jej budowę i zasadę działania omówimy nieco dalej, ale w tym momencie trzeba z naciskiem podkreślić to, co jest jej najbardziej uderzającą cechą: jest zbudowana z prostych elementów połączonych według bardzo prostych reguł i działających w oparciu o bardzo proste reguły. W zderzeniu ze stopniem komplikacji mózgu sieć neuronowa jest wręcz prymitywna. Ale właśnie dlatego wszystkie procesy, które w niej zachodzą, możemy dokładnie prześledzić, przeanalizować, zrozumieć. To wielka zaleta! (Rys. 4).



Rys. 4. Zrozumienie mózgu przekracza obecnie nasze możliwości, natomiast zrozumienie tego, co się dzieje w sieci neuronowej jest możliwe, a nawet łatwe.

Pojawiają się jednak także pewne obiekcje. Powodów do sceptycyzmu jest wiele, poczynając od tego, że mózg jest (z punktu widzenia złożoności struktury) naprawdę ogromny, podczas gdy budowane przez informatyków sieci neuronowe są o wiele mniejsze. Odpowiednie przeliczenia pokazują, że relacja pomiędzy liczbą neuronów w mózgu a liczbą neuronów w typowej sieci neuronowej jest taka sama, jak relacja między wielkością kuli ziemskiej i główki szpilki (rys. 5).



Rys. 5. Proporcje mózgu i sieci neuronowej są takie, jak proporcje kuli ziemskiej i główki szpilki

Czy wobec tego jest możliwe uzyskanie jakichkolwiek użytecznych wniosków na temat tak ogromnego systemu podczas badania tak małego jego modelu?

Odpowiedź na to pytanie jest twierdząca. Owszem, można badać zjawiska w bardzo małej próbce, wyciągając wnioski, które potem potwierdzają się w znacznie większej skali. Jeśli chemik prześledzi jakąś reakcję zachodzącą w maleńkiej kropli wody, to możemy być pewni, że dokładnie w taki sam sposób to samo zjawisko zachodzić będzie w ogromnym oceanie (Rys. 6).



Rys. 6. Kropla jest mała, a ocean ogromny. Ale mechanizmy chemiczne i fizyczne zbadane w kropli są identyczne jak w oceanie. Skala badanego obiektu nie wpływa bowiem na naukową ścisłość wyniku badania

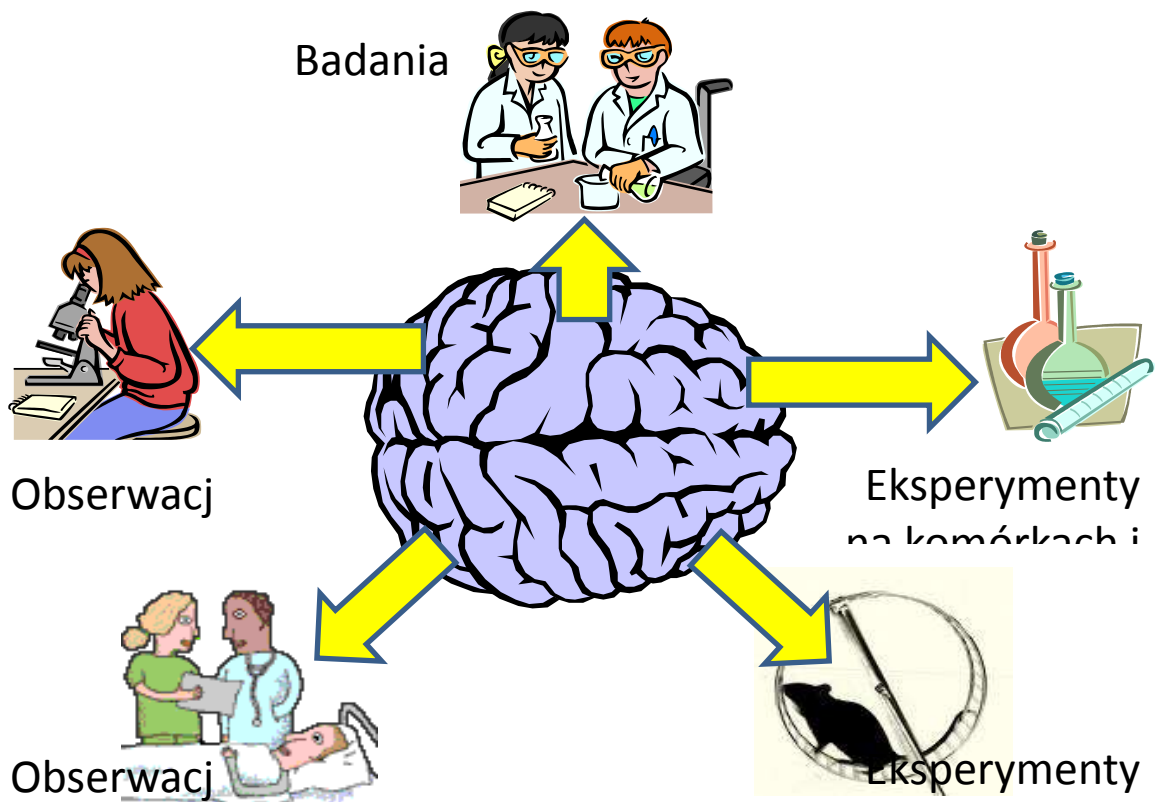
Jeśli zatem potrafimy zbudować sieć neuronową w której wytworzymy pewne zjawiska nawiązujące do interesujących nas procesów psychicznych – to sieci te mogą stać się „poligonem” na którym będziemy mogli sprawdzać koncepcje dotyczące natury i funkcjonowania elementów naszej psychiki.

Spójrzmy na ten problem najpierw w sposób bardzo ogólny, jako na problem zdobycia wiedzy o mózgu człowieka „w ogóle” (czyli pewna wypadkowa wiedza o mózgach wielu ludzi, badanych w różnych okolicznościach i eksponujących różne aspekty i właściwości tego zadziwiającego tworu, a potem spróbujemy spojrzeć przez pryzmat umysłowości konkretnego interesującego nas przykładu – modelowania aktywności twórczej i rozwoju mózgu konkretnego człowieka – Antonio Gaudiego, twórcy, kreatora, wizjonera.

Zacznijmy od ustalenia, co i skąd możemy wiedzieć o mózgu człowieka, żeby ewentualnie tę wiedzę wykorzystać w modelowaniu funkcjonowania tego szczególnego człowieka.

2. Badania mózgu i rozumienie mózgu

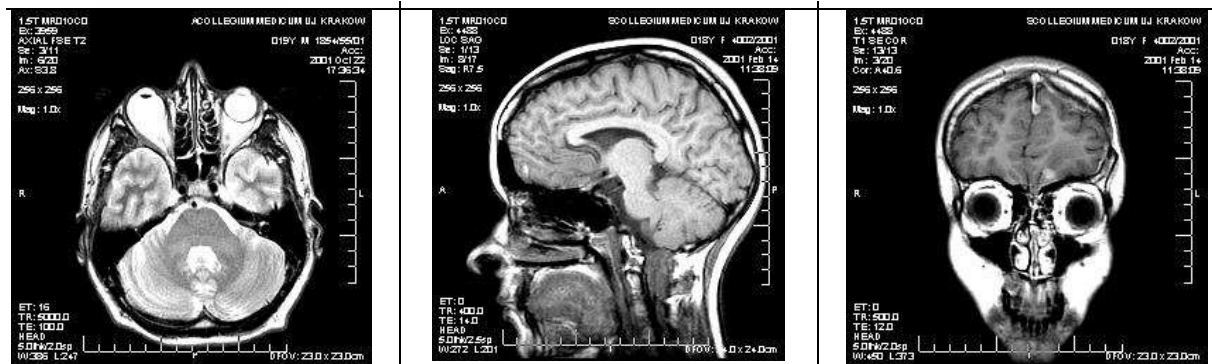
Na niedobór wiadomości szczegółowych na temat mózgu „w ogóle” z pewnością nie możemy narzekać. Jak wiadomo ostatnia dekada XX wieku nazwana była nawet „dekadą mózgu”, gdyż badania tego narządu były wtedy traktowane priorytetowo i były prowadzone na szeroką skalę. W rezultacie różne dyscypliny naukowe dostarczyły różnych informacji pozwalających opisać ten zadziwiający twór w różnych aspektach (rys. 7).



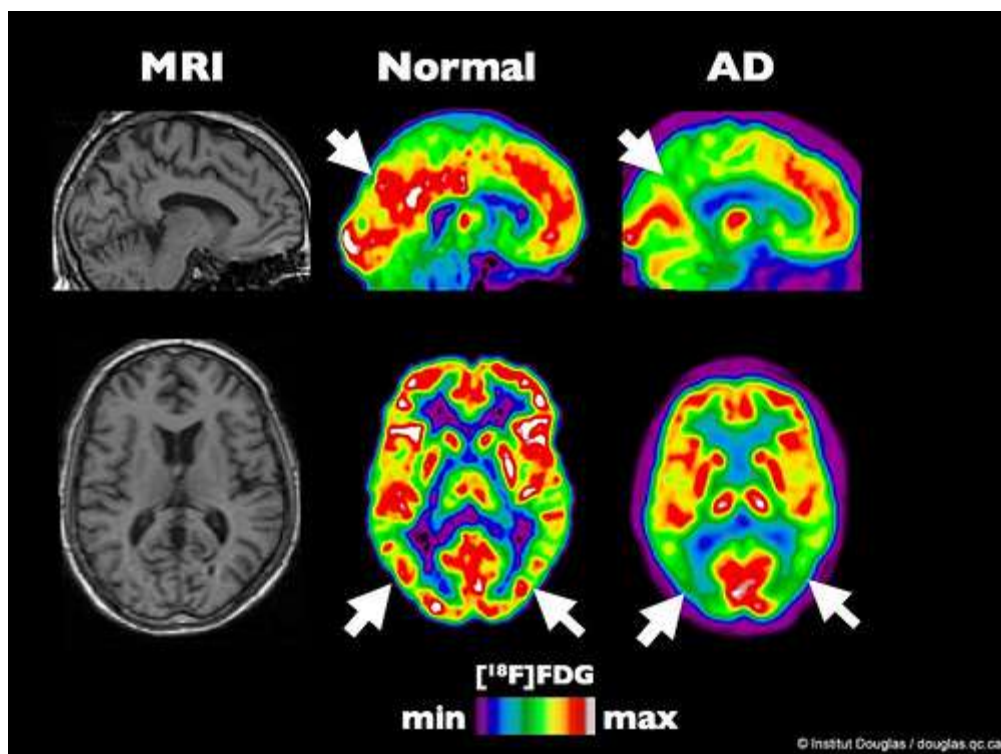
Rys. 7. Różne dziedziny dostarczają różnych składników wiedzy o mózgu

Zgromadziliśmy i gromadzimy nadal coraz więcej informacji o budowie mózgu zarówno w skali mikro- jak i w skali makro. Co więcej, nowoczesne metody obrazowania medycznego (tomografia

komputerowa, rezonans magnetyczny, technika PET itp.) pozwalając badać budowę mózgu żywych pacjentów (Rys. 8), a także pozwalając w pewnym zakresie śledzić przebiegające w mózgu procesy – stwarzają zupełnie nowe perspektywy w tym zakresie (Rys. 9).



Rys. 8. Tomograficzne obrazy wnętrza czaszki pozwalają dokładni poznać budowę mózgu konkretnego człowieka w sposób całkowicie dla niego bezpieczny



Rys. 9. Przykład obrazowania mózgu z wykorzystaniem metod MRI oraz PET (przykład zmian wywołanych chorobą Alzheimera (źródło: <http://www.flickr.com/photos/institut-douglas/2677257668/>)

Poznajemy także coraz lepiej procesy biochemiczne, jakie w mózgu zachodzą i dostrzegamy rolę, jaką w tych procesach odgrywają różne związki chemiczne. Z kolei badania mikroelektrodowe i inne obserwacje bioelektryczne (na przykład analizy EEG) ujawniają całą złożoność zjawisk biofizycznych zachodzących w mózgu, a zwłaszcza związanych z powstawaniem oraz propagowaniem potencjałów i impulsów nerwowych.

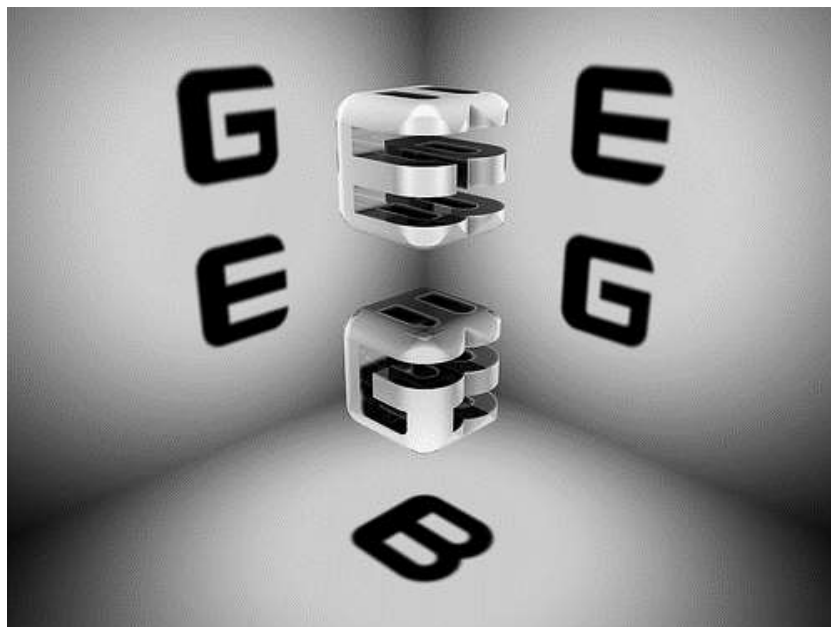
Wzbogaca się też dostępne instrumentarium. Potrafimy prowadzić eksperymenty na żywych tkankach nerwowych (badania *in vitro*) oraz na całych mózgach zwierzęcych (badania *in vivo*).

Badania te są obecnie najbogatszym źródłem nowych informacji na temat form działania mózgu i na temat czynników wpływających na modyfikowanie tych form działania. Nie można jednak także zapominać o tym, że stale nowe informacje o działaniu mózgu człowieka dostarczane są poprzez obserwacje kliniczne, gdyż mózg człowieka chorego łatwiej ujawnia swoje tajemnice niż perfekcyjnie działający mózg osoby całkowicie zdrowej.

Ten bardzo pobieżny i powierzchowny rzut oka na **niektóre** tylko źródła nowych danych o mózgu wskazuje na to, że metod badania mózgu mamy sporo i stale przybywają nowe. Każde z tych źródeł dostarcza ogromnych ilości danych szczegółowych, których liczba i różnorodność stanowi wartość samą w sobie, ale których interpretacja zaczyna już obecnie stanowić bardzo poważny problem – nie mówiąc o tym, że nowe informacje i nowe odkrycia napływają wciąż rosnącą falą.

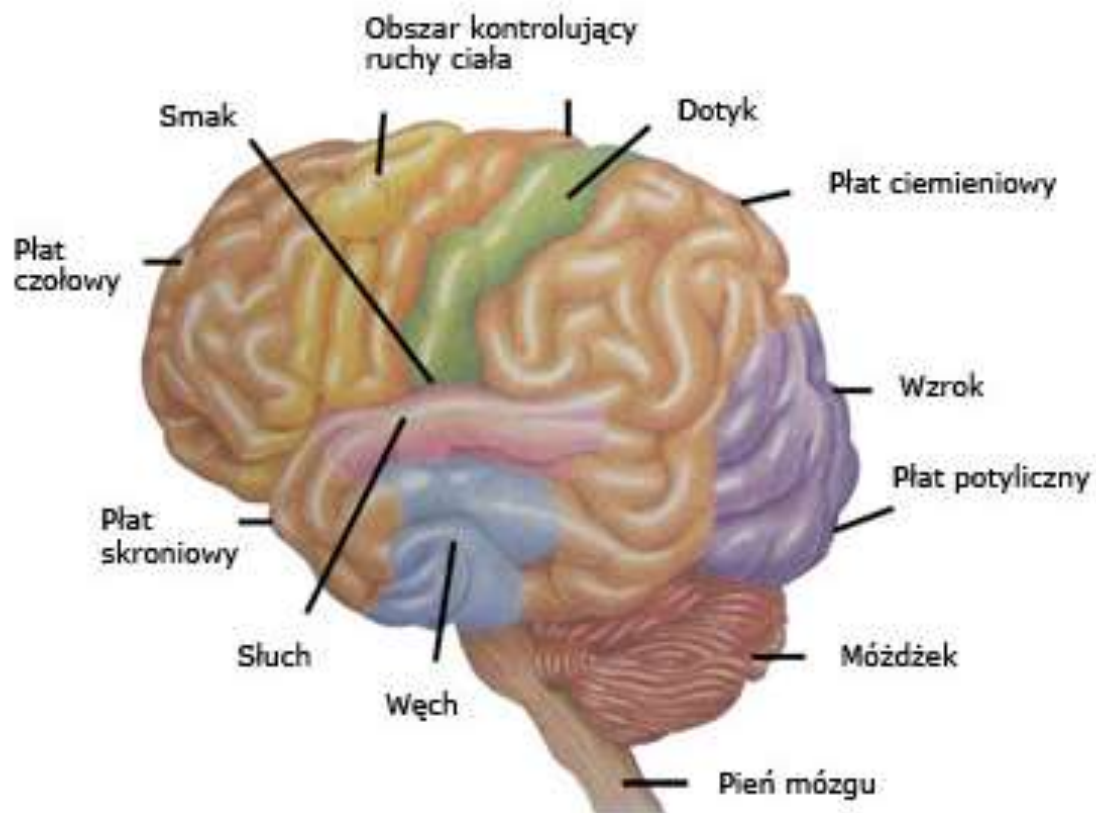
Wobec tego potopu danych naukowych badacze z nadzieją spoglądają w kierunku informatyki jako narzędzia, którego naturalną własnością jest właśnie radzenie sobie z dużymi ilościami danych. Te nadzieje i te oczekiwania mogą być **częściowo** spełnione, ponieważ komputerowe bazy i banki danych już dziś pomagają w wybiórczym docieraniu do źródeł (do literatury), a w zakresie uprawnień jakie wynikają z przynależności do określonych grup badawczych pomagają badaczom w procesie gromadzenia i systematyzowania danych pochodzących wprost z najnowszych badań empirycznych. W dystrybucji wyników bardzo pomagają także repozytoria i hurtownie danych dostępne zarówno lokalnie jak i zdalnie poprzez sieci komputerowe, a specjalistyczne portale internetowe w coraz większym stopniu pełnią forum wymiany poglądów i terenu dysput naukowych, uzupełniając, a częściowo także zastępując tradycyjne konferencje naukowe.

Wszystko to prawda, ale wszystkie te narzędzie gromadzenia i dystrybucji coraz liczniejszych szczegółowych informacji o mózgu nie mogą się do niczego przydać w kontekście zadania ich interpretacji i rozumienia. Im więcej bowiem szczegółowych informacji gromadzimy – tym bardziej oddala się od nas oddala perspektywa **zrozumienia całości**. Na rysunku 10 pokazano, że złożony twór ukazuje różne właściwości w zależności od tego, z jakiego kierunku rzucimy strumień światła, który go oświetli.



Rys. 9. Złożona struktura ukazuje inny wygląd w zależności od tego, jak ją oświetlimy (tzn. z jakiego punktu widzenia ją badamy) (Źródło: http://farm1.static.flickr.com/36/92895501_4ead5997a5.jpg)

A takiego właśnie całościowego zrozumienia mózgu bardzo potrzebujemy w kontekście najbardziej frapującej kwestii, jaką można podnieść w odniesieniu do tego narządu: W jaki sposób w biologicznych strukturach tego narządu pojawia się kategoria, która interesuje psychologa, a nie fizjologa czy farmakologa – mianowicie **intelekt** oraz **twórczy talent**?



Rys. 11. Jedna z wielu „map” pokazujących lokalizację w mózgu obszarów związanych z różnymi funkcjami

Wszystkim Czytelnikom tego artykułu znane są niewątpliwie różne „mapy” mózgu, na których oznaczone są lokalizacje różnych obszarów funkcjonalnych związanych z różnymi formami aktywności: pole wzrokowe w płatach potylicznych, obszar związany ze słuchem w płatach skroniowych, zakręt zaśrodkowy z czuciem wrażeń dotykowych, zakręt przedśrodkowy kontrolujący ruchy dowolne i postawę ciała... Takich fragmentów o dobrze zdefiniowanych zadaniach można wskazać wiele i każdy z nich jest związany z jakąś własnością albo z jakąś formą działania mózgu (rys. 11). Jednak na pytania: „gdzie się mieści inteligencja?”, „gdzie się toczą procesy twórcze?” „gdzie rodzi się nowy pomysł?” - nie możemy udzielić jednoznacznej odpowiedzi, bo z danych empirycznych zdaje się wynikać, że wymienione atrybuty ludzkiej umysłowości mieszczą się właściwie **wszędzie** (rys. 12)



Rys. 12. Intelpekt i geniusz twórczy nie mają w mózgu ścisłej lokalizacji, tak jakby się znajdowały „wszędzie” (tzw. lokalizacja holistyczna)

Cała struktura nowej kory mózgu ma większy albo mniejszy udział w kształtowaniu inteligentnych form zachowania człowieka, a to oznacza, że intelekt oraz talent twórczy nie jest po prostu jeszcze jedną biologiczną funkcją struktur nerwowych budujących mózg, tylko wynika z nich na zasadzie **emergencji**.

Powiedzmy to odważnie i szczerze: Mózg nie powstał po, to umożliwić abstrakcyjne myślenie oraz by kreować dzieła artystyczne. Biologiczny mózg miał (i ma nadal!) głównie szereg funkcji potrzebnych do jego działania jako **regulatora** funkcjonowania całego organizmu. Służy między innymi do kojarzenia informacji z narządów zmysłów z odpowiednim działaniem – na przykład z atakiem lub ucieczką. I tylko tyle!

Powstanie umysłu (i inteligencji) było natomiast następstwem **emergencji**.



Rys. 13. Przykład emergencji. Objaśnienia w tekście (źródło: <http://www.flash-gry.pl/zludzenia-optyczne.asp?klam=51>)

Termin „emergencja” bywa rozmaicie rozumiany, więc może przytoczmy tu tę definicję, na której będziemy się opierać w tej pracy: Emergencja to spontaniczne powstawanie ze zbioru elementów pewnego rodzaju czegoś całkiem nowego, czego żaden z tych elementów rozważany osobno sam z siebie nie posiada. Definicję tę dobrze ilustruje rysunek 13, który pokazuje, jak zbiorowość elementów jednego rodzaju może wytworzyć obiekt zupełnie innego rodzaju, całkowicie niepodobny do żadnego z elementów składowych.

Jest rzeczą oczywistą, że w przypadku emergencji nawet najdokładniejsze badania elementów składowych nie przyczynią się do zrozumienia struktury i znaczenia całości. Tymczasem metodyka większości badań prowadzonych na mózgu zakłada jego dzielenie na części (rys. 14) .



Rys. 14. Metoda dzielenia na części obiektu badań sprzyja poznawaniu szczegółów, natomiast nie zbliża nas do zrozumienia całości (źródło: http://www.wired.com/images_blogs/wiredscience/2011/04/ff_brainatlas.jpeg)

Nie ulega wątpliwości, że dzielenie obiektu badań na elementy składowe pozwala skoncentrować wysiłek i uzyskać więcej szczegółowych informacji, jednak im dokładniej dzielimy obiekt badań i im drobniejsze części bierzemy pod uwagę – tym trudniej jest nam ogarnąć **całość**. Dlatego chcąc **zrozumieć** mózg, a do tego dążymy w projekcie „Wirtualny Gaudi”, musimy sięgnąć do próby ogarnięcia całości jego struktury i funkcji – a to jest prawie niewykonalne, ponieważ stopniem złożoności mózg człowieka, a zwłaszcza mózg genialnego twórcy, przewyższa wszystkie inne twory przyrody ożywionej i nieożywionej. Ta złożoność jest główną przeszkodą przy próbach zrozumienia jego działania, a zwłaszcza jego kreatywności w jej różnych wymiarach. W rzeczywistym mózgu prześledzenie wszystkich zależności, jakie występują pomiędzy jego elementami, procesów, które w nim zachodzą, związków przyczynowych oraz ich skutków – jest skrajnie trudne. Niektórzy filozofowie

nauki twierdzą wręcz, że istnieje fundamentalna niemożność ogarnięcia ludzkim intelektem (który jest niewątpliwie wytworem mózgu) złożoności mózgu jako takiego. Zdaniem tych badaczy samo formułowanie takiego zadania jest równie niedorzeczne jak próba podniesienia siebie samego za włosy (rys. 15) .



Rys. 15. Próba zrozumienia mózgu za pomocą mózgu przypomina próbę podniesienia siebie samego góry metodą ciągnięcia się za włosy. Rysunek nawiązuje do postaci barona Muenchhausena, znanego łgarza, który opowiadał, że dokonał takiej sztuki gdy jego koń zapadł się w bagnie. (Źródło:

<http://www.bog-solutions.de/bilder/MuenchhausenWeb.jpg>)

W tej sytuacji całą nadzieję pokładać musimy w technice modelowania, która pozwala nam badać złożone problemy (na przykład powstanie i rozwój Wszechświata) za pomocą odtwarzania tych problemów w postaci symulacji komputerowych tych samych problemów przedstawianych w bardzo dużym uproszczeniu – ale właśnie dzięki temu przydatnych w procesach poznawczych. Jeśli więc zastąpimy bardzo skomplikowany mózg jego bardzo prostym modelem to zyskamy niewątpliwie jedną rzecz: możliwość zrozumienia tego, co się tam dzieje.

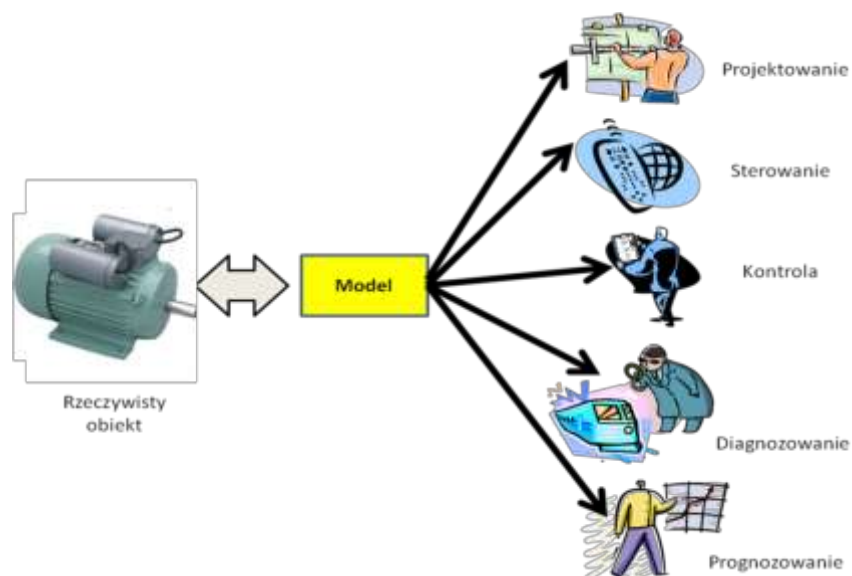
3. Sieci neuronowe

Pisząc ten artykuł założono, że potrzebnego nam modelu mózgu będziemy poszukiwali w z góry zdeterminowanej formie, którą (na zasadzie arbitralnego wyboru) mają być sieci neuronowe. Tymczasem rzutując biologiczną wiedzę o mózgu na płaszczyznę matematycznych opisów i komputerowych symulacji (rys. 16) możemy uzyskać wiele różnych modeli. Co jest powodem takiej preferencji?



Rys. 16. Rzutując wiedzę o mózgu na płaszczyznę matematyki i obliczeń komputerowych można stworzyć bardzo wiele różnych modeli (źródło: <http://www.biztechreport.com/images/imagecache/large/biomedical%20engineering.png>)

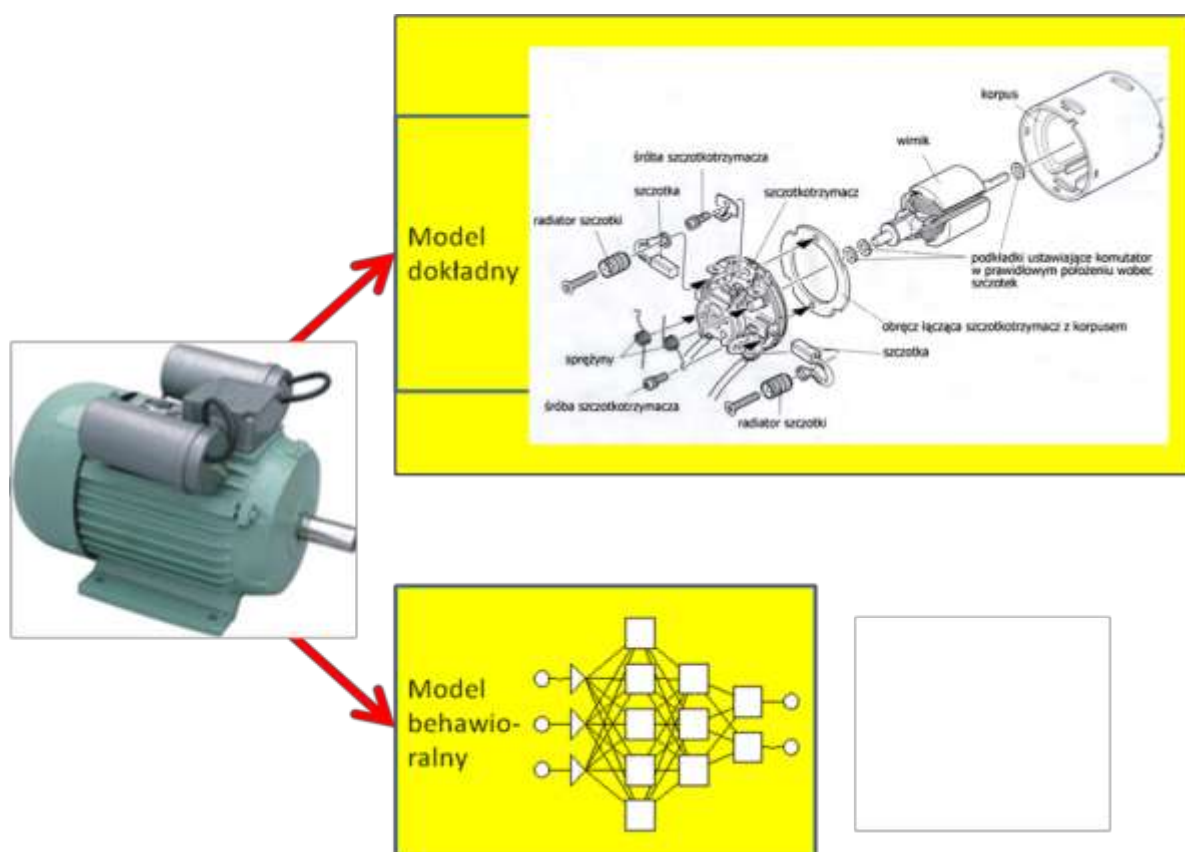
Otóż sieć neuronowa traktowana jako narzędzie informatyczne może służyć do bardzo wielu różnych celów, ale szczególnie ceniona jest na skutek zdolności ci modelowania różnych systemów. Modeli tych systemów potrzebujemy zwykle ze względów czysto praktycznych. Na rysunku 17 podano przykładowe zastosowania pewnego obiektu technicznego (silnika, ale to nie ma znaczenia). Wszystkie wymienione na rysunku 17 czynności (projektowanie, sterowanie, kontrola itd.) mogą być przy użyciu modelu wykonane łatwiej i taniej, niż gdyby na każdym kroku i w każdej sprawie trzeba było odwoływać się do rzeczywistego obiektu. Jak z tego wynika, posiadanie modelu rozważanego obiektu powoduje, że możemy osiągnąć wiele praktycznych korzyści, dlatego technicy (ale także ekonomiści, fizycy, astronomowie i pracownicy wielu innych zawodów) bardzo chętnie odwołują się w swoich pracach do różnych modeli.



Rys. 17. Przykładowe zastosowania modelu rzeczywistego obiektu

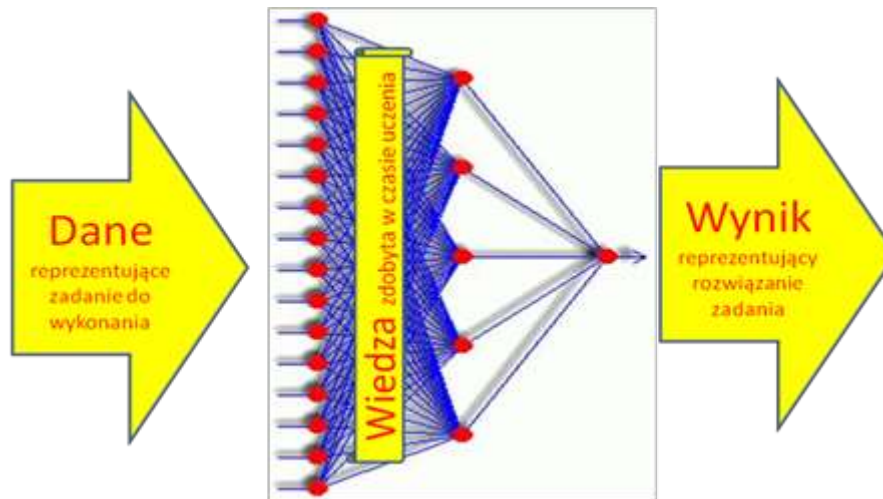
Problem polega jednak na tym, że model miło jest mieć i używać, ale trudno jest go stworzyć. Żeby zbudować **dokładny** model rozważanego obiektu, na przykład silnika, trzeba uwzględnić jego budowę, potem prześledzić i zapisać w modelu wszystkie zjawiska i procesy, jakie mają miejsce w rzeczywistym obiekcie, uwzględnić w modelu prawa fizyki oraz doświadczenia technologów (na przykład związane z formami zużycia silnika podczas pracy) itd. Gdy się to wszystko zrobi i uwzględni, to otrzyma się model rozważanego systemu, ale jest on z reguły skomplikowany i trudny w użyciu.

Jednak – jak to pokazano na rysunku 18 – zamiast modelu dokładnego można użyć modelu behawioralnego. Właśnie sieć neuronowa może być takim modelem behawioralnym. Tworząc model dowolnego systemu za pomocą sieci neuronowej nie trzeba się odwoływać do jakiegokolwiek teorii, ani nie trzeba znać tych wszystkich zależności przyczynowo-skutkowych, które są niezbędne do tego, żeby zbudować model dokładny. W sieci neuronowej wystarczy obserwacja wejść i wyjść rozważanego systemu, aby sieć w wyniku procesu uczenia nauczyła się naśladować zachowanie modelowanego systemu, czyli stała się jego modelem behawioralnym. Model behawioralny jest narzędziem z całą pewnością prymitywnym, ale jest łatwy do sporządzenia i bardzo wygodny w użyciu. Dlatego w literaturze można znaleźć niezliczone przykłady wykorzystania sieci neuronowych jako modeli przeróżnych systemów, przy czym w większości przypadków użytkownikom tych sieci nie przeszkadzało w osiągnięciu ich celów to, że dysponowali jedynie modelem behawioralnym, to znaczy zgodnym z oryginalnym systemem wyłącznie pod względem zachowania. W taki sam sposób będziemy wykorzystywać sieci w tej pracy.



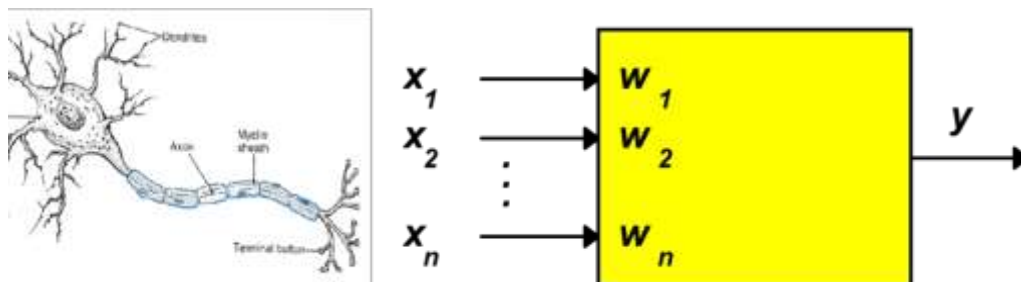
Rys. 18. Sieć neuronowa jako behawioralny model rozważanego systemu (wykorzystano rysunek ze strony http://members.rc.info.pl/zdjecia/sloownik/budowa_silnika.jpg)

Działanie sieci neuronowej w dowolnym zastosowaniu ilustruje rysunek 19 (nawiązujący do rysunku 1). Jak widać zasada tego działania opiera się na fakcie, że sieć neuronowa gromadzi w swojej strukturze (a dokładniej – w wartościach współczynników wag synaptycznych wiedzę zdobywaną w procesie uczenia. Dzięki posiadaniu tej wiedzy sieć może rozwiązać dowolne zadanie, jeśli tylko wcześniej (podczas procesu uczenia) dostarczono jej dostatecznie dużo przykładów takich zadań wraz z ich poprawnymi rozwiązaniami. Mając nauczoną sieć można uzyskać potrzebne rozwiązanie podając na wejście sieci sygnały reprezentujące dane, na podstawie których chcemy znaleźć rozwiązanie, a sieć dostarczy nam wyniku, będącego rozwiązaniem postawionego zadania. Wymaganych wyników może być więcej – i wtedy sieć ma na końcu nie jeden, lecz kilka neuronów wyjściowych – patrz także rys. 22.



Rys. 19. Ilustracja typowego działania sieci neuronowej

Zatrzymajmy się na chwilę nad analizą rysunku 19. Na rysunku tym widzimy sieć jako pewną strukturę połączonych ze sobą elementów. Są to sztuczne neurony, zwykle mające budowę, którą w największym uproszczeniu przedstawia rysunek 20. Na schemacie przedstawionym na rysunku 20 nie podano żadnych szczegółów budowy neuronu, bo nie są tu istotne, natomiast wskazano, że sygnał wyjściowy y neuronu zależy jest zarówno od sygnałów wejściowych x_1, x_2, \dots, x_n jak i od parametrów wewnętrznych, tak zwanych wag w_1, w_2, \dots, w_n , reprezentujących wiedzę neuronu.



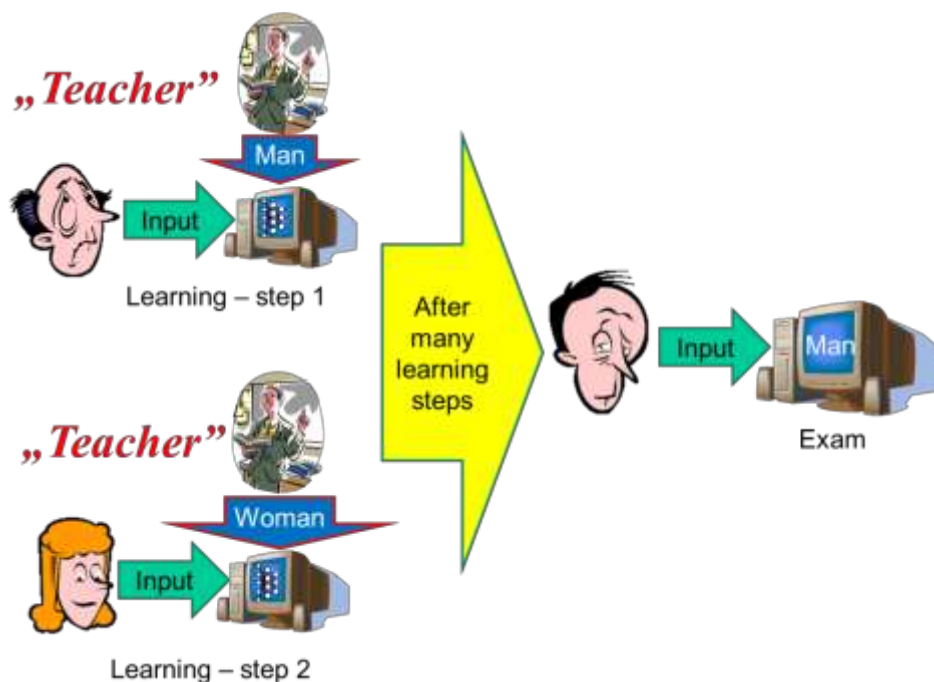
Rys. 20. Sztuczny neuron, będący podstawowym składnikiem sieci neuronowej wraz ze szkicem kształtu prawdziwego biologicznego neuronu, mającego także wiele wejść i jedno wyjście

Po lewej stronie na rysunku 19 jest strzałka reprezentująca dane wejściowe. Tutaj także nie pokazano jeszcze żadnych konkretów, ale widzimy w jaki sposób stawia się sieci zadanie do rozwiązania: – trzeba wszystkie jego istotne elementy przedstawić w postaci sygnałów możliwych do wprowadzenia do neuronów. Wymaga to czasem dokładnego przemyślenia tego, co w danej zadaniu jest ważne i jak

te ważne informacje podać, żeby mogły być przyjęte przez sieć, ale to się opłaca. Również rozwiązanie zadania ma postać sygnału pojawiającego się na wyjściu neuronu, który jest ostatnim elementem sieci. Trzeba zatem tak sformułować zadanie, które chcemy rozwiązać, żeby sygnał z wyjściowego neuronu (zwykle mający formę liczby przyjmującej wartości z przedziału od 0 do 1) można było zinterpretować (zrozumieć) jako odpowiedź na pytanie, które zostało postawione w zadaniu.

4. Uczenie i samouczenie sieci neuronowych

W typowych zastosowaniach sieci neuronowych kluczowe znaczenie ma proces **uczenia**. W trakcie uczenia dąży się do tego, żeby zachowanie sieci uzgodnić z pewnym zachowaniem wzorcowym, przedstawianym przez tak zwanego nauczyciela. Przedstawia to umownie i w bardzo dużym uproszczeniu rysunek 21.

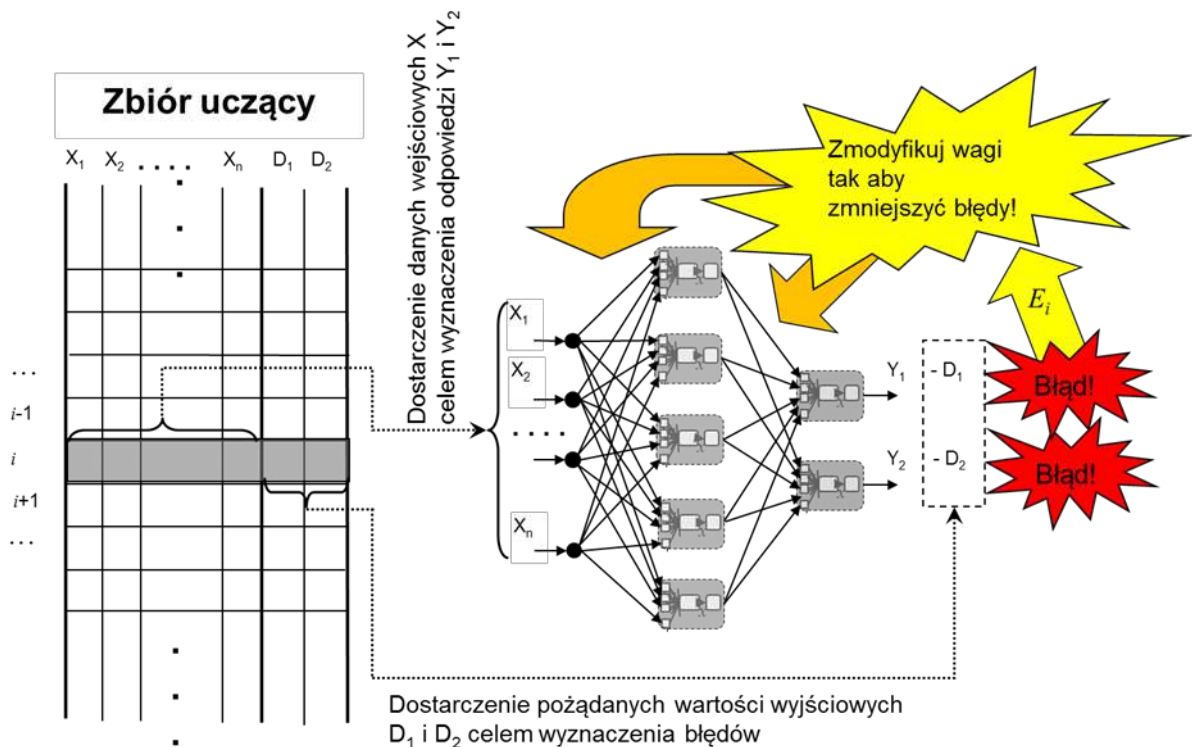


Rys. 21. Schemat ilustrujący (w sposób nieco umowny) proces uczenia sieci neuronowej. Zadanie polega na rozpoznaniu na podstawie twarzy, czy prezentowana osoba jest mężczyzną, czy kobietą

W rzeczywistości nie występuje żaden żywy „nauczyciel”. Uczenie w rzeczywistości realizowane jest przez automatyczny algorytm wykorzystujący tak zwany zbiór uczący. Zbiór ten zawiera przykłady prawidłowo rozwiązanych zadań tego typu, jakie ma potem rozwiązywać uczona sieć neuronowa. Zadania te są przedstawione w formie rekordów w bazie danych będącej tym właśnie zbiorem uczącym (patrz rys. 22), przy czym pierwsza część każdego rekordu zawiera dane wejściowe dla sieci (oznaczone X_1, X_2, \dots, X_n) zaś druga pożądaną (poprawnie rozwiązującą postawione zadanie) sygnały wyjściowe z sieci, które na rys. 22 oznaczone jako D_1 i D_2 . Po wprowadzeniu na wejście uczonej sieci kompletu sygnałów wejściowych X , sieć (poprzez przetwarzanie informacji we wszystkich jej neuronach i przesyłanie informacji pomiędzy neuronami) wyznacza swoje sygnały wyjściowe Y_1 i Y_2 (odpowiednio na dwóch swoich wyjściach). Różnica między wzorcami prawidłowych odpowiedzi D_1 i D_2 a rozwiązaniami dostarczonymi przez sieć w postaci sygnałów wyjściowych Y_1 i Y_2 jest podstawą

do modyfikowania wartości wag we wszystkich neuronach sieci. Zasady modyfikowania wag sieci na podstawie błędów jej działania dostrzeganych na etapie procesu uczenia jest podstawą procesu uczenia sieci. W następstwie tego procesu we wszystkich neuronach sieci ustalane są nowe (lepsze) wartości współczynników wag, a wyżej wskazano, że właśnie wartości tych współczynników są odpowiednikiem wiedzy gromadzonej przez sieć.

W taki sposób przebiega uczenie sieci neuronowych i jest ono składnikiem 90% ich zastosowań.

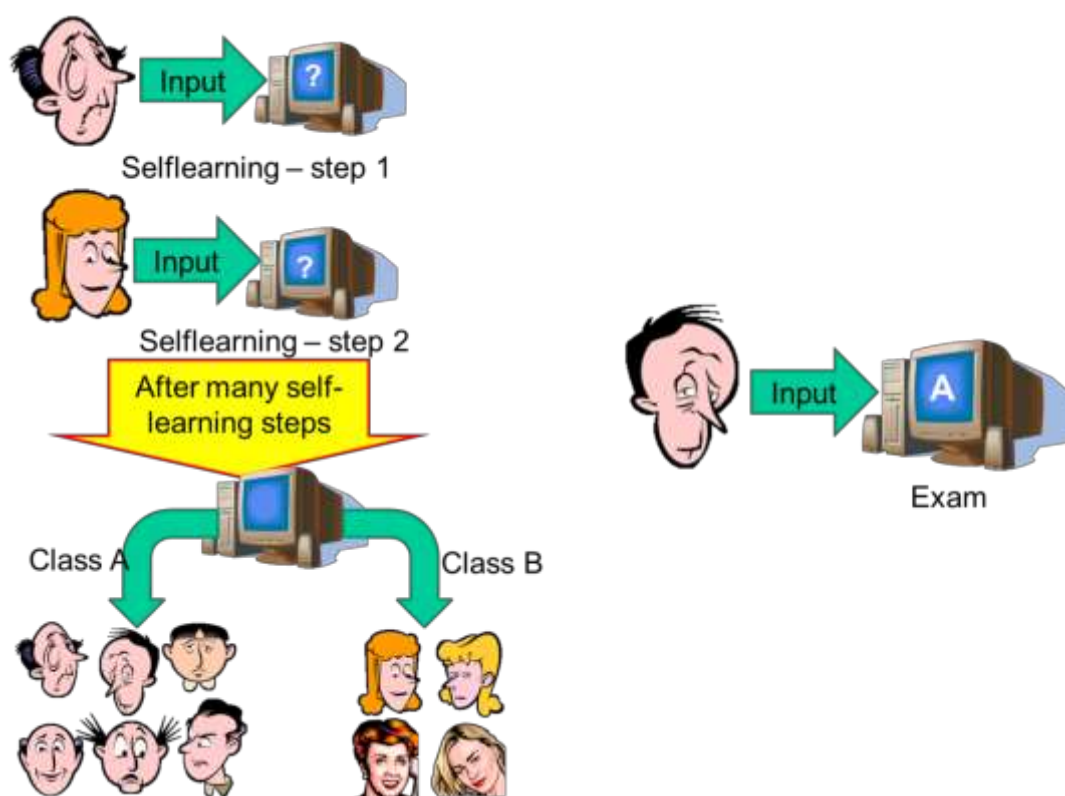


Rys. 22. Schemat procesu uczenia sieci neuronowej

Opisany wyżej (w największym skrócie...) proces uczenia sieci neuronowej nie nadaje się do tego, żeby go użyć w modelu neuronowym używanym w projekcie „wirtualny Gaudi” ponieważ w projekcie tym zamierzamy modelować w sieci neuronowej procesy, które odpowiadają aktywności twórczej umysłu architekta, a jak wiadomo kreatywności nie można się nauczyć. Przyjęcie modelu „uczenia z nauczycielem” musiałoby prowadzić do założenia, że istniał jakiś „Mistrz nad mistrze”, który formował (posługując się przykładami) w umyśle Gaudiego umiejętność tworzenia jego unikatowych dzieł – a to założenie nie daje się obronić na gruncie czystego racjonalizmu (jakkolwiek mogłoby znaleźć uznanie w kontekście rozważań metafizycznych).

Dlatego w tej pracy przyjęto, że rozważane sieci neuronowe będą podlegały uczeniu według modelu „uczenia bez nauczyciela”, nazywanego także niekiedy **samouczeniem**. Przykład samouczenia (nawiązujący do tego samego zadania, jakie było rozwiązywane na rysunku 21) przedstawiono na rysunku 23. Jak widać w trakcie samouczenia sieć neuronowa kontaktuje się wyłącznie ze strumieniem danych wejściowych (tak jak artysta obcuje z przyrodą i architekturą wzniesioną przez innych twórców) – i efektem tego jest całkiem spontaniczny wzrost umiejętności samodzielnego

klasyfikowania i kategoryzowania obserwowanych obiektów – oczywiście przy braku nauczyciela bez możliwości prawidłowego nazywania **odkrywanych** klas. W ostatnim zdaniu użyto słowa „odkrywanie” – i jest ona tu jak najbardziej na miejscu. O ile bowiem przy uczeniu z nauczycielem można mówić o tym, że sieć **nabywa** wiedzę (od nauczyciela), że ją przyswaja i wykorzystuje, o tyle w zadaniu samouczenia sieć musi sama **odkryć**, jakie właściwości (często nieoczekiwane dla użytkownika sieci!) posiadają obserwowane przez siebie dane. Tego typu zastosowania wiążą się z problematyką wydobywania wiedzy z danych (tzw. *data mining*) oraz z modnym ostatnio pakietem problemów związanych z hasłem *Big Data*, ale tego wątku nie będziemy tu rozwijali.



Rys. 23. Przykładowy przebieg samouczenia

5. Szczegóły procesu samouczenia

Sieci neuronowe samouczące się miewają czasem dość złożoną strukturę i skomplikowane zasady działania – na przykład tak zwane sieci Kohonena. Dla potrzeb tej pracy skorzystamy jednak z najprostszej struktury samouczącej się sieci neuronowej znanej w literaturze pod nazwą „neuronowego gazu”. Sieć tego typu uczona metodą wywodzącą się z prac amerykańskiego neurofizjologa, Donalda Hebba (tzw. *Hebbian learning*) który badał procesy samouczenia na zwierzętach wykazuje ciekawe własności, które omówimy odwołując się do pewnego hipotetycznego zastosowania – mało prawdopodobnego w praktyce, ale dobrze pobudzającego wyobraźnię.

Otóż wyobraźmy sobie, że wysyłamy sondę na nieznaną planetę. Liczymy się z tym, że nasz lądowik może zaobserwować na tej planecie jakieś formy życia, ale nie wiemy, ile rodzajów tych kosmitów znajdziemy i jakie będą oni wykazywali właściwości. Dlatego zamiast komputera zaprogramowanego

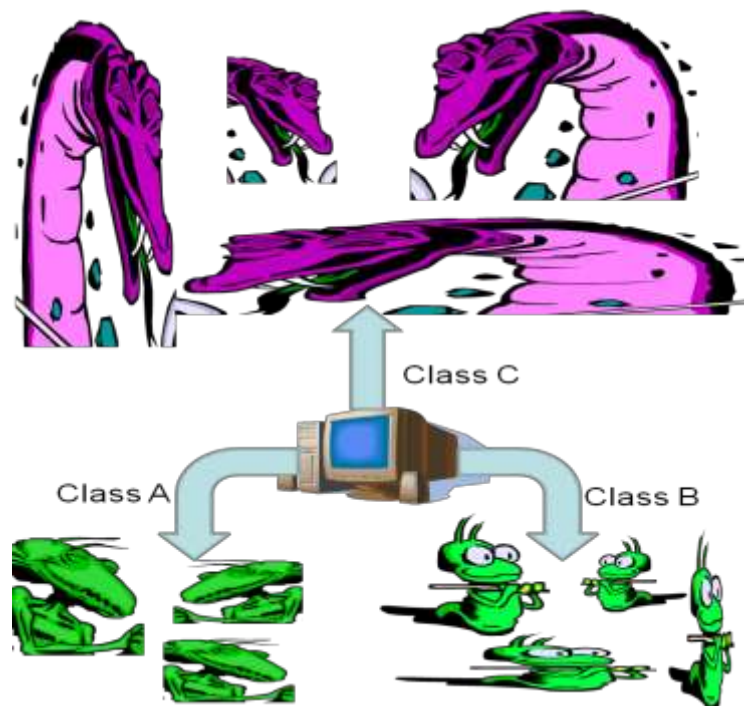
na wykrywanie i badanie jakichś wcześniej przewidzianych form życia – wysyłamy sieć neuronową samouczącą się, która zaobserwuje i sama sklasyfikuje formy życia, z jakimi się zetknie.

Kontynuując te czysto fantastyczne rozważania możemy sobie wyobrazić, że lądownik osiadł na powierzchni planety i został otoczony przez kosmitów (Rys. 24).



Rys. 24. Hipotetyczna sytuacja w której mogłaby pracować samoucząca się sieć neuronowa.

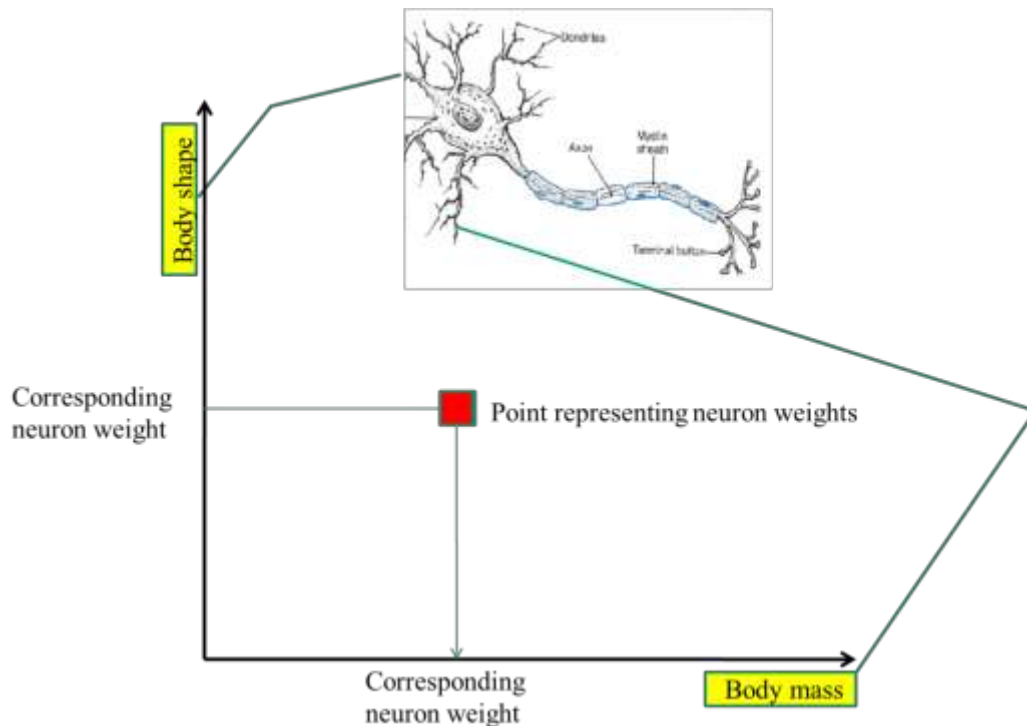
Na podstawie rysunku 23 możemy oczekiwać, że sieć neuronowa odbierająca sygnały z różnych sensorów rejestrujących różne cechy pojawiających się obiektów po pewnym czasie potrafi te obiekty klasyfikować i rozpoznawać (rys. 25).



Rys. 25. Klasyfikacja kosmitów wypracowana automatycznie przez samouczącą się sieć neuronową.

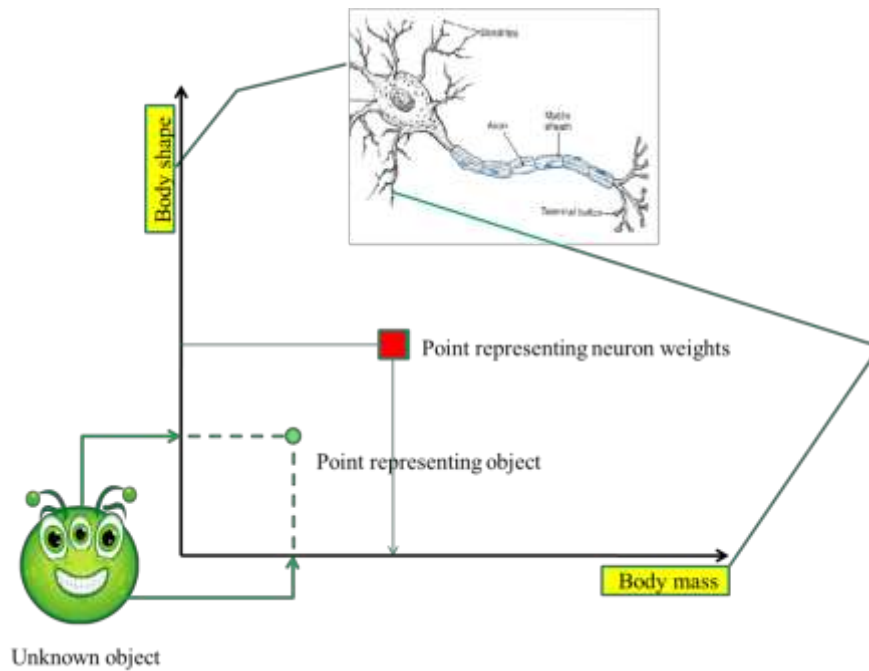
Przyjrzyjmy się, jak doszło do tej klasyfikacji, bo to będzie klucz do dalszych rozważań.

Założmy, że obiekty (kosmicy) klasyfikowani są na podstawie dwóch tylko sygnałów, które docierają do neuronów sieci (żeby to się dało narysować na płaskim dwuwymiarowym wykresie, którego każda oś odpowiada jednemu z sygnałów wejściowych). Każdy z tych dwóch sygnałów dociera do wejścia neuronu (tak zwanej synapsy) mającej określoną **wagę**. Na rysunku 20 zasygnalizowano już to, że z każdym sygnałem wejściowym x_i związana jest waga w_i . W związku z tym aktualny „stan wiedzy” rozważanego neuronu można reprezentować w postaci punktu na wspomnianym dwuwymiarowym wykresie, tak jak to pokazano na rysunku 26.



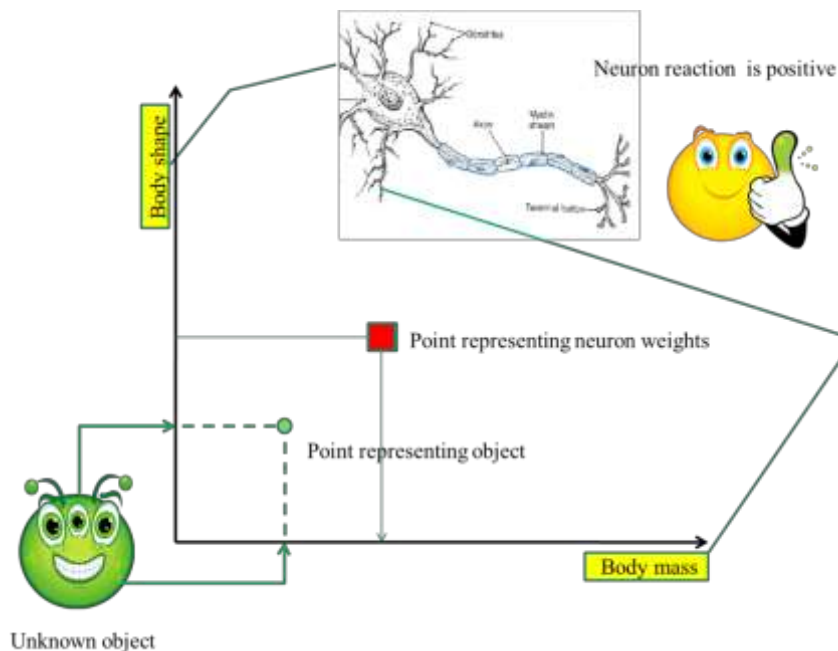
Rys. 26. Reprezentacja wiedzy neuronu (w postaci wag na jego obu wejściach) na wykresie, którego osie opisane są cechami rozpoznawanego kosmity.

Gdy na wejściach rejestrujących sygnały z otoczenia pojawią się dane obserwowanego kosmity – będą one wyznaczały punkt w tej samej przestrzeni (Rys. 27).



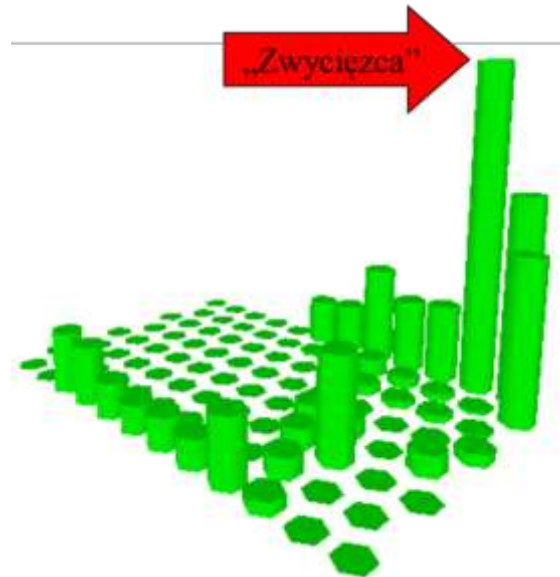
Rys. 27. Łączna prezentacja rozpoznawanego obiektu i parametrów wyznaczających wiedzę neuronu

Z opisu matematycznego działania neuronu (pominiętego w tym opracowaniu, ale łatwego do znalezienia w wymienionej na końcu pracy literaturze) wynika, że sygnał wyjściowy neuronu będzie tym silniejszy dodatni, im bliżej punktu reprezentującego obiekt wejściowy znajdować się będzie punkt reprezentujący wiedzę (wagi) neuronu. Silny sygnał dodatni można utożsamiać z tym, że neuron „lubi” ten obiekt, którego dane pojawiły się na jego wejściu (Rys. 28).



Rys. 28. Neuron „lubi” obiekty, których sygnału są blisko jego wag.

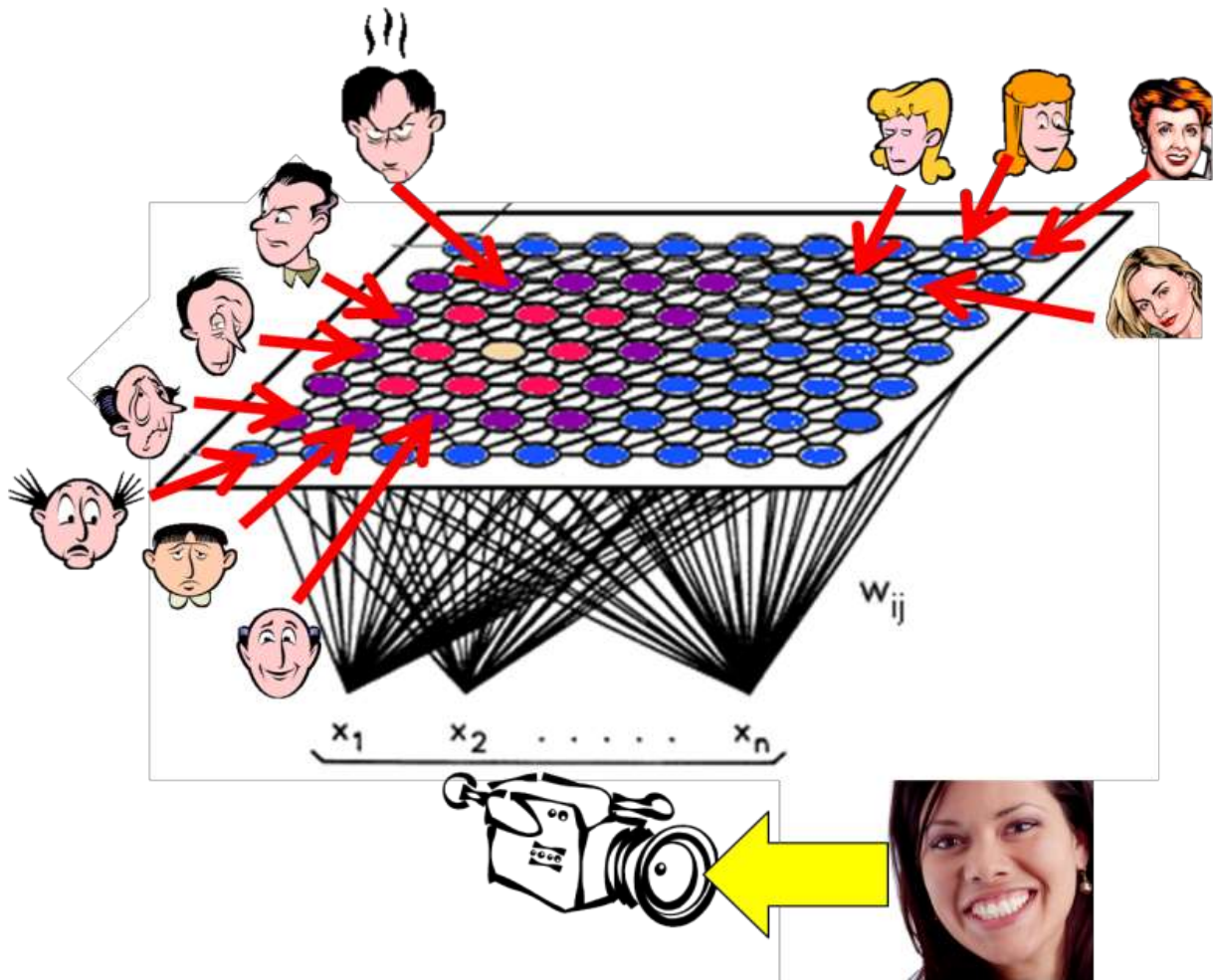
Ponieważ – jak zaznaczono na rysunku 28 - neuron „lubi” obiekty, których sygnały są blisko jego wag, to w typowych zastosowaniach sieci neuronowych ten neuron staje się wykrywaczem (detektorem) takich właśnie obiektów. Ilekroć na wejściu sieci pojawi się jakiś obiekt – to wszystkie neurony wyliczają swoje sygnały wyjściowe, ustalając, w jakim stopniu ten pokazany obiekt zbliża się do ich „ideału” zawartego w wektorze wag. Porównując sygnały wyjściowe z całej grupy neuronów możemy wykryć, który z neuronów przechowuje w swojej pamięci (w wartościach wag) „wzorzec” najbardziej zbliżony do tego obecnie pokazanego obiektu – i ten właśnie neuron zostaje „zwycięzcą” (Rys.29).



Rys. 29. Wyłonienie „zwycięskiego” neuronu

Czy na podstawie faktu, że określony neuron jest „zwycięzcą”, można zorientować się, jak wygląda obiekt, którego pojawienie się uczyniło ten właśnie neuron „zwycięzcą”?

Owszem, gdyż komplet wag każdego neuronu zawiera w sobie wzorzec obiektu, który dany neuron będzie chętnie wykrywał. Każda waga neuronu to „ulubiona” wartość odpowiedniego sygnału charakteryzującego rozpoznawany obiekt. Komplet tych sygnałów – to „portret” rozpoznawanego obiektu. Wiedząc, jakie wartości wag mają poszczególne neurony, możemy sobie odtworzyć, jakie obiekty chcą one rozpoznawać (rys. 30). Ten element rozumowania będzie ważny przy prezentacji dalszych wyników i przy wyciąganiu wniosków istotnych z punktu widzenia tej pracy – więc warto na tym na chwilę zatrzymać uwagę.



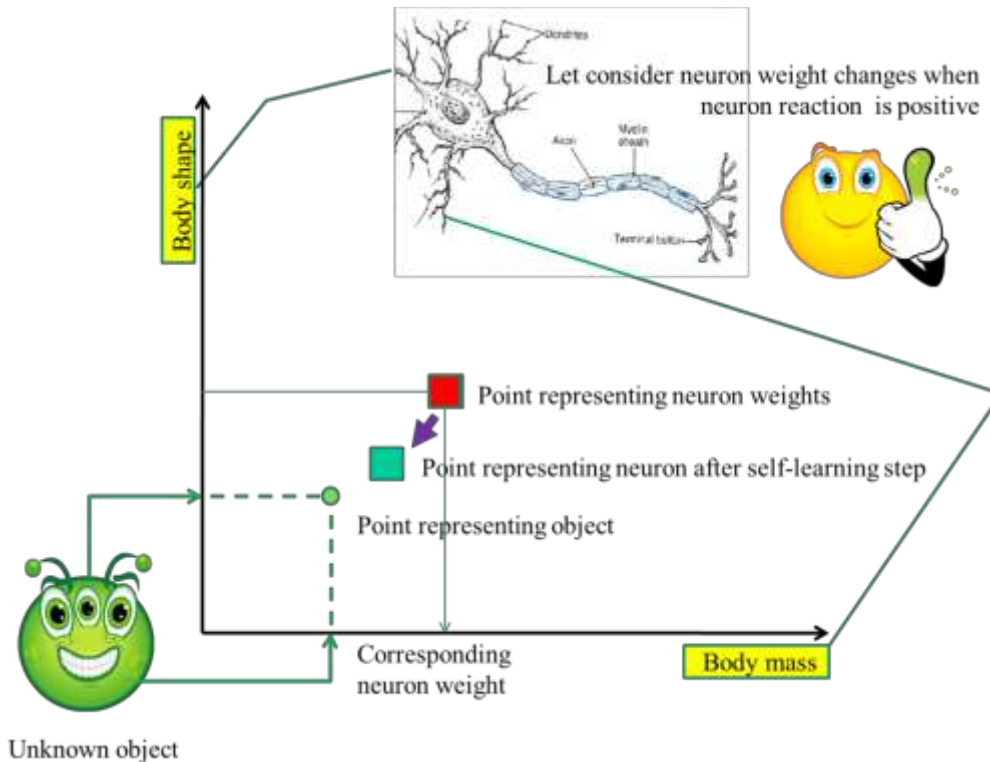
Rys. 30. Schemat sieci neuronowej klasyfikującej z umownym zaznaczeniem obiektów, które chcą rozpoznawać poszczególne neurony

Wiemy już, że zestawy wag poszczególnych neuronów można utożsamiać z wzorcami obiektów, które owe neurony chcą rozpoznawać, naturalnym pytaniem jest jednak to, skąd się biorą owe zestawy wag?

Otóż mogą one powstać w sieci spontanicznie w następstwie procesu samouczenia. Proces taki zaczyna się od tego, że wszystkim wagom wszystkim neuronom w sieci nadaje się wartości początkowe **losowe**. Oznacza to, że położenia początkowe kwadracików zaznaczających lokalizację zestawów wag poszczególnych neuronów na płaszczyźnie cech rozpoznawanych obiektów (takiej jak narysowana na rysunkach 26, 27 i 28 będą czysto losowe. Tych kwadracików jest w praktyce dużo, bo samouczące się sieci neuronowe buduje się z setek lub tysięcy neuronów, a ponadto są one rozrzucone przypadkowo nie na płaszczyźnie, ale w wielowymiarowej przestrzeni, bo rzeczywiste obiekty podlegające klasyfikacji mogą być charakteryzowane nie przy pomocy zaledwie dwóch cech (co pozwala tę sytuację narysować na płaszczyźnie) ale przy pomocy dziesiątków lub nawet setek różnych cech – co kieruje nas w trudne do wyobrażenia regiony przestrzeni wielowymiarowych, które jednak z obliczeniowego punktu widzenia żadnych trudności nie sprawiają.

Wychodząc od tej mgławicy setek punktów losowo rozsianych w wielowymiarowej przestrzeni sieć zaczyna gromadzić wiedzę obserwując nadchodzące dane stosując technikę samouczenia wywodzącą

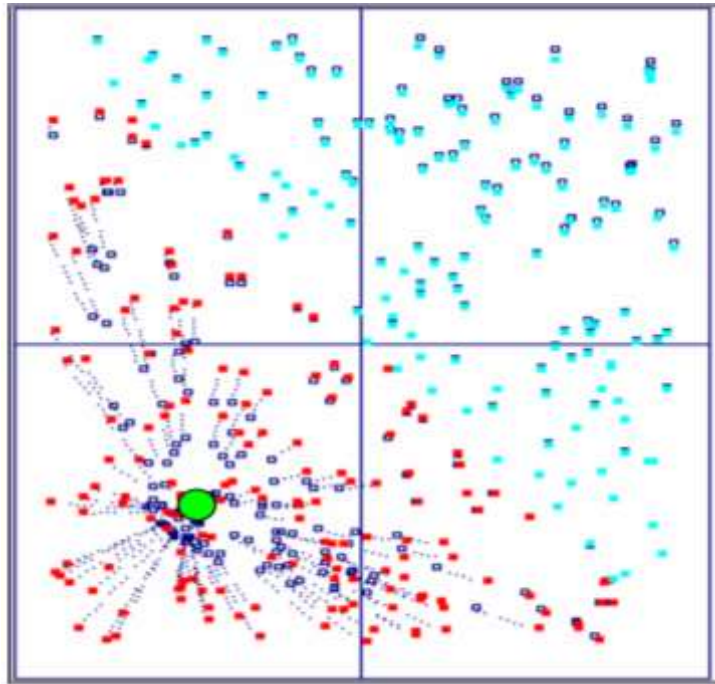
się ze wspomnianych wyżej prac Donalda Hebba. Nie wchodząc w szczegóły owo samouczenie polega na tym, że jeśli jakiś zestaw sygnałów wejściowych powoduje pozytywną reakcję neuronu, to jego wagi zostają zmienione tak, aby **nieco** zbliżyły się do położenia punktu reprezentującego ten obiekt wejściowy, który tę pozytywną reakcję spowodował. Ilustruje to rysunek 31 nawiązujący do rysunków 26, 27 i 28.



Rys. 31. Jeden krok procesu uczenia w przypadku, kiedy neuron pozytywnie zareagował na obiekt

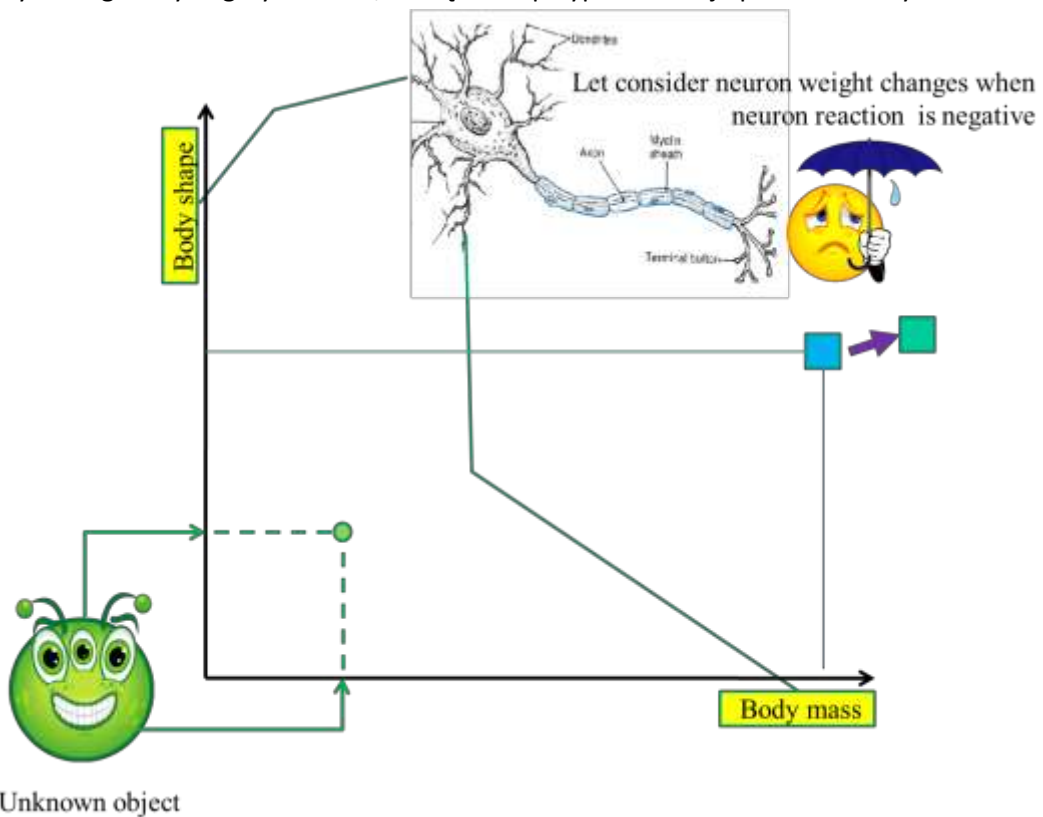
Widać, że położenie punktu reprezentującego wagi neuronu, oznaczone czerwonym kwadratem, zmieniło się w taki sposób, że nowe położenie tego punktu znajduje się **bliżej** punktu reprezentującego wejściowy obiekt. Mówiąc potocznie – następuje tu pogłębienie preferencji. Jeśli obiekt „podał się” neuronowi to wiedza neuronu ulega takiej modyfikacji, że następnym razem ten sam obiekt (lub obiekt do niego podobny, czyli mający zbliżoną lokalizację w rozważanej przestrzeni sygnałów) będzie się **jeszcze bardziej** neuronowi podobał. Na marginesie warto dodać, że od tej pory w tym artykule czerwony kolor stale będzie używany do oznaczenia na rysunkach punktów odpowiadających tym neuronom, które na dany obiekt (aktualnie przedstawiany zestaw sygnałów wejściowych) reagują pozytywnie.

Opisany wyżej efekt przyciągania ma dominujące znaczenie przy procesach samouczenia sieci neuronowych. Można to prześledzić na rysunku 32, na którym widać ten efekt w postaci trajektorii przemieszczeń (zaznaczonych przerywanymi liniami zaczynającymi się w czerwonych kwadratach) punktów reprezentujących wagi neuronów, które miały pozytywny stosunek do obiektu wejściowego, którego lokalizację pokazuje (podobnie jak na rysunkach 26, 27 i 28 i 31) zielone kółko.



Rys. 32. Przemieszczenia punktów reprezentujących wartości wag neuronów następujące w wyniku jednego kroku procesu samoczenia wywołanego przez pojawienie się obiektu wejściowego oznaczonego zielonym kółkiem

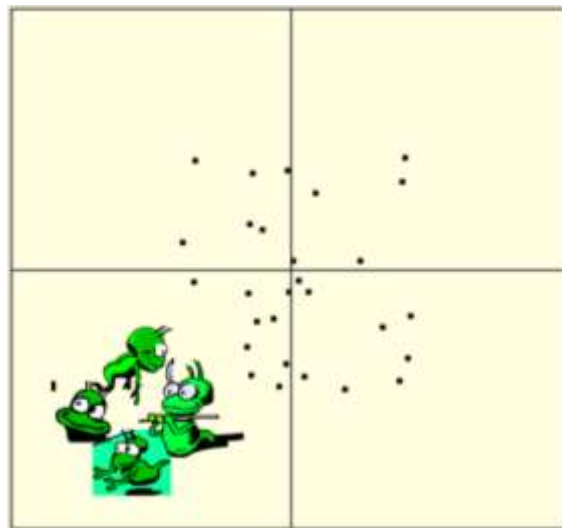
Na rysunku 32 widoczne są też kwadraty niebieskie. Są to neurony, które na rozważany sygnał wejściowy zareagowały negatywnie. To, co się w ich przypadku dzieje przedstawia rysunek 33.



Rys. 33. Krok samoczenia przy negatywnym nastawieniu neuronu do wejściowego obiektu

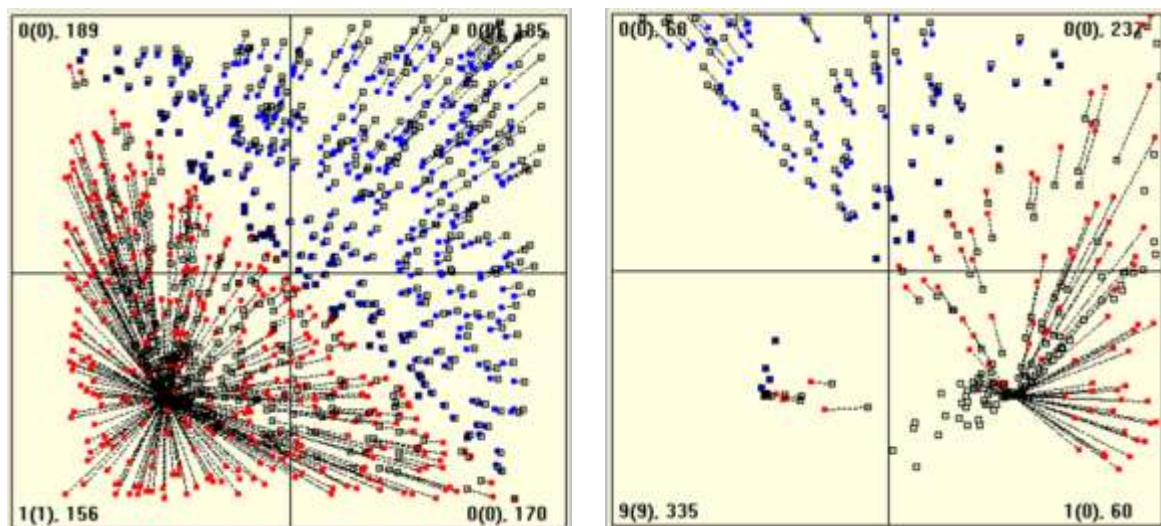
Jak widać neuron negatywnie nastawiony do obiektu (oznaczany na niebiesko) zmienia swoje wagi tak, aby się od obiektu oddalić, czyli „jeszcze bardziej go znieubić”.

Efektom opisanego procesu samouczenia jest stopniowe „krystalizowanie się” w sieci wzorców często występujących obiektów. Jeśli wyobrazimy sobie, że w naszym żartobliwym przykładzie z kosmitami w pewnym ograniczonym rejonie przestrzeni sygnałów wejściowych będą się pojawiać wielokrotnie obiekty pewnej klasy (zapewne kosmici tego samego gatunku), to chociaż lokalizacja każdego z tych obiektów będzie trochę inna, to utworzy się „strefa przyciągania” (Rys. 34).



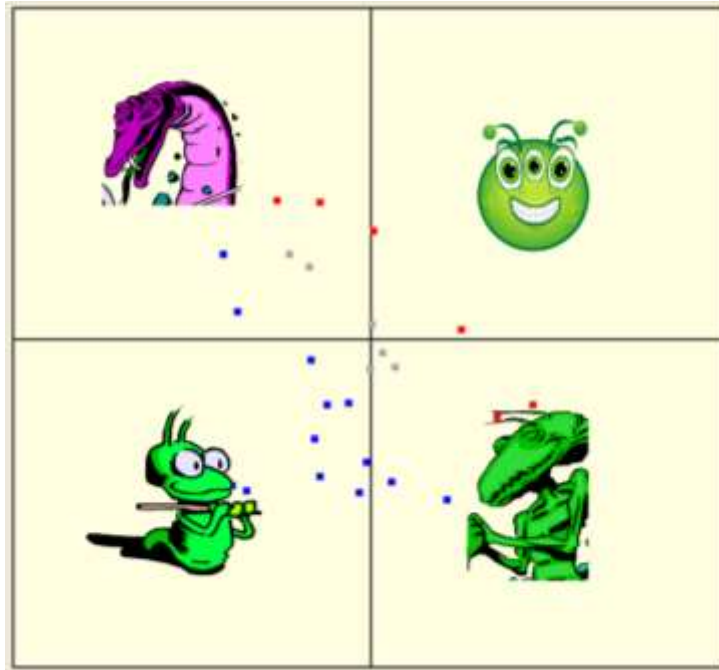
Rys. 34. Strefa przyciągania stworzona przez wiele obiektów podobnych do siebie

Do tej strefy przyciągania zmierzać będą kolejne neurony, które w efekcie stworzą ciasne skupisko identyfikujące rozważaną klasę obiektów (Rys. 35).



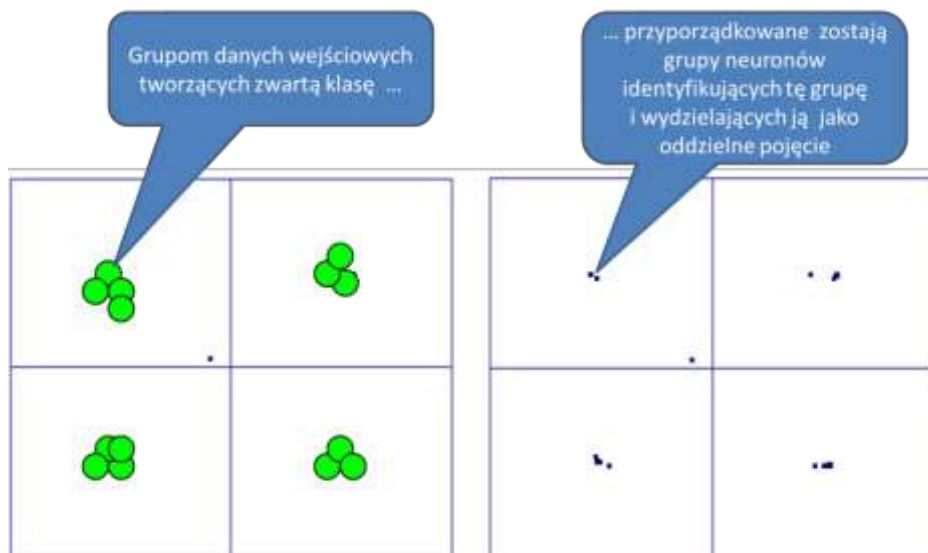
Rys. 35. Efekt tworzenia się skupiska neuronów, będącego wzorcem obiektu rozważanej klasy

Jeśli na wejściu sieci pojawi się kilka typów rozważanych obiektów (kilkę gatunków obserwowanych kosmitów) – to każdy z nich utworzy w efekcie własne skupisko neuronów, które właśnie obiekty tej klasy będą identyfikować i rozpoznawać (Rys. 36).



Rys. 36. Obiekty różnych klas tworzą skupiska neuronów w różnych rejonach przestrzeni sygnałów

Gdyby (w hipotetycznym przykładzie lądownika planetarnego) naukowcy z Ziemi zajrzeli do pamięci sieci neuronowej – to by na podstawie tych skupisk stwierdzili, ile różnych gatunków kosmitów wykryła sonda, a badając wagi neuronów w poszczególnych skupiskach mogliby także stwierdzić, jak ci kosmici wyglądają i jakie mają właściwości (bo w wagach neuronów zawarty jest „wzorzec” rozpoznawanego obiektu).



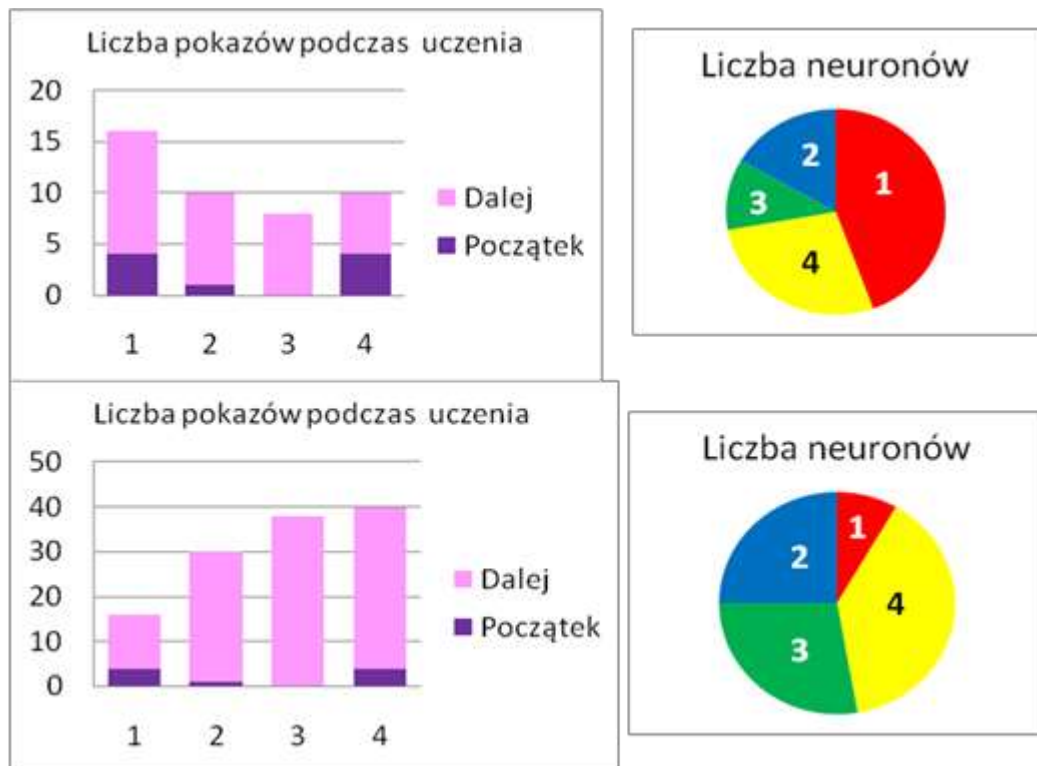
Rys. 37. Proces samouczenia sieci neuronowej jako automatyczne formułowanie pojęć

Oczywiście przykład z kosmitami jest żartem, ale proces tworzenia skupisk neuronów odpowiadających poszczególnym klasom rozważanych obiektów jest bardzo interesujący poznawczo. Jeśli spojrzeć na to, co się dzieje w samouczącej się sieci neuronowej, z punktu widzenia bardzo ogólnego, to można postawić tezę, że odpowiada to poniekąd procesowi **formowania pojęć**. (Rys.

37) Odkrywanie, że w świecie obiekty łączą się w pewne klasy, a potem wyodrębnienie i nazwanie tych klas jest fundamentalnym procesem tworzenia w umyśle człowieka wewnętrznego modelu zewnętrznego świata. Podobny proces w większej skali ma miejsce podczas naukowego poznawania jakiejś dziedziny – kategoryzacja obiektów i pojęć jest w tym procesie procesem kluczowym. W związku z tym to, co robi samoucząca się sieć jest w istocie procesem kreowania wiedzy, a nie nabywania wiedzy (co robią typowe sieci neuronowe uczące się z nauczycielem).

6. Powstawanie elementów spontanicznej twórczej kreacji w samouczących się sieciach neuronowych

Opisane wyżej (oczywiście w wielkim uproszczeniu i skrócie) procesy samouczenia sieci neuronowych same w sobie są interesujące, bo pozwalają zamodelować szereg fenomenów napotykanym podczas nabywania wiedzy przez ludzi – na przykład wypieranie z pamięci dawno nie używanych wiadomości (rys. 38).



Rys. 38. Proces zapominania nie odświeżanych umiejętności w samouczącej się sieci neuronowej.

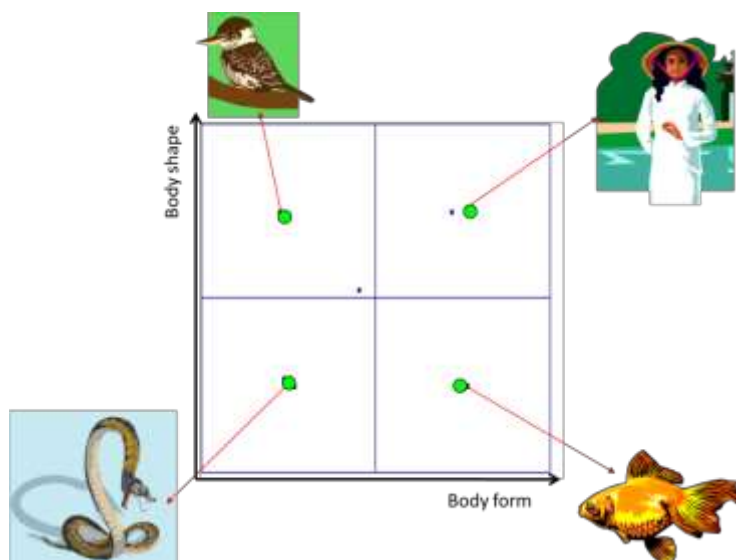
W początkowej fazie procesu uczenia (pierwszych 100 pokazań, wyniki góry rysunku) obiekty należące do 4 rozpoznawanych klas są pokazywane z mniej więcej jednakową częstością (co pokazują słupki po lewej stronie rysunku), w wyniku czego liczby neuronów skupionych w poszczególnych odpowiadających im grupach są mniej więcej jednakowe (wykres kołowy po prawej stronie). Na tej części rysunku można dodatkowo zauważyć kilka wiarygodnych psychologicznie szczegółów: Obiekty z klasy nr 1 pojawiały się nieco częściej niż inne w trakcie procesu samouczenia, dlatego liczba neuronów, jaką sieć zgromadziła i zaangażowała dla rozpoznawania obiektów należących do klasy 1 jest większa, niż liczby neuronów zaangażowane w identyfikację obiektów w pozostałych klasach – co odpowiada znanej z codziennego doświadczenia obserwacji, że częściej powtarzane wiadomości (na przykład słówka obcego języka) są lepiej zapamiętywane. Na rysunku widać też efekt lepszego zapamiętywania tych wiadomości, które pojawiły się na początku procesu

samouczenia. Porównując ślady pamięciowe dla klas 2 i 4 można zauważyć przewagę klasy 4, której łączna liczba pokazów była taka sama jak dla klasy 2, ale było znacznie więcej pokazów obiektów klasy 4, które miały miejsce w początkowym etapie procesu uczenia (odpowiednie fragmenty słupków na rysunku 38 zaznaczone są ciemniejszym kolorem).

Dolna część rysunku pokazuje, co się dzieje dalej. Otóż eksperyment tak poprowadzono, że w dalszym etapie procesu uczenia (następnych 100 pokazów) obiekty klasy 1 praktycznie nie występowały (vide słupki po lewej stronie dolnej części rysunku przedstawiające **łączną** liczbę pokazów obiektów poszczególnych klas w całym cyklu procesu uczenia). Wykres kołowy po prawej stronie natychmiast się zmienił – neuronów pamiętających obiekty klas 2, 3 i 4 zdecydowanie przybyło, natomiast „kapitał” neuronów pamiętających obiekty klasy 1 radykalnie zmalał – i łatwo przewidzieć, że przy odpowiednio długo prowadzonym eksperymencie zasób neuronów związanych z klasą 1 zmaleje do zera, co oznacza, że klasa ta – dawniej pamiętana szczególnie dobrze – zostanie całkowicie zapomniana.

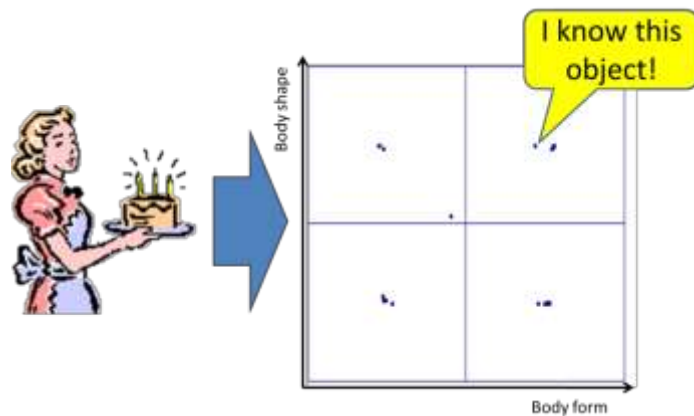
Takich ciekawostek pokazujących, że bardzo prosty model sieci neuronowej samouczącej się może być zaskakująco dobrym symulatorem procesów i zjawisk związanych z uczeniem się człowieka – można by było przytoczyć jeszcze dużo. Jednak ten wątek jest odległy od tego, czym się zajmujemy w tym opracowaniu, więc go pominiemy odsyłając zainteresowanych Czytelników do pracy [5] w której ten pakiet zagadnień jest obszernie naświetlony, z licznymi przykładami. Z kolei psychologiczne interpretacje badań prowadzonych na sieciach neuronowych opisane są w pracy [6], a ich neurofizjologiczne tło w pracy [7]. Natomiast dla tego opracowania ważne jest po raz pierwszy zasygnalizowane w pracy [8] zjawisko **spontaniznego pojawiania się w sieci neuronowej znamion samodzielnej pracy twórczej**, które potem w pogłębiony i poszerzony sposób przedstawiono w pracy [9]. Na tej ostatniej pracy oparte są dalsze rozważania w tym opracowaniu.

Wyobraźmy sobie, że sieci przedstawiamy w trakcie procesu uczenia dane należące do czterech kategorii (rys. 39): kobiet, ptaków, ryb oraz gadów.



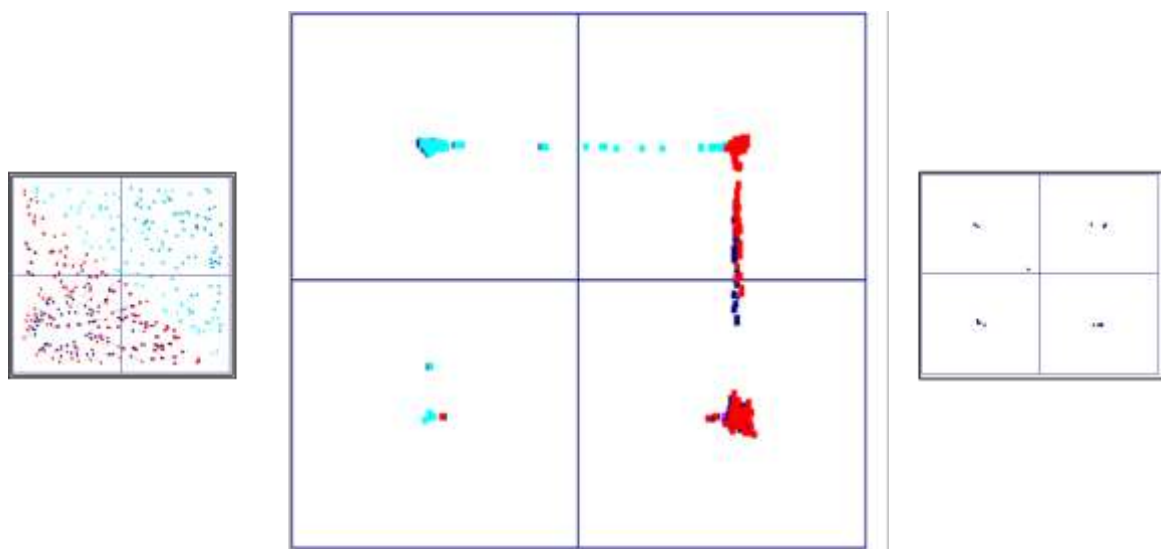
Rys. 39. Przykładowe zadanie samouczenia.

W zadaniu tym gdy już proces uczenia zostanie doprowadzony do końca poszczególne dobrze zogniskowane grupy neuronów będą mogły rozpoznawać obiekty rozważanych klas (Rys. 40)



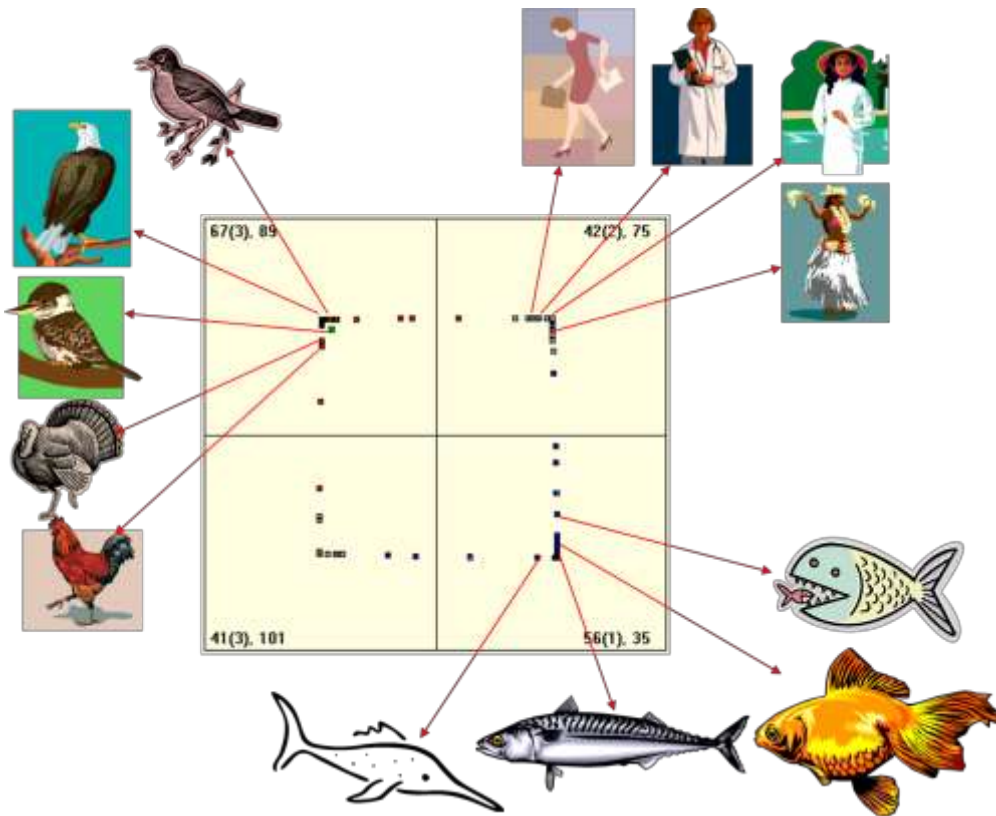
Rys. 40. Wykorzystanie nauczonej sieci

Natomiast ciekawe zjawisko udało się wykryć, gdy rozważano zachowanie omawianej tu sieci samouczącej w stadium **częściowego nauczania**. Stadium to, zajmujące pośrednie położenie pomiędzy początkowym chaosem całkowicie losowo rozrzuconych neuronów a końcowym porządkiem dobrze już zogniskowanych grup neuronów rozpoznających poszczególne klasy (takim jak na rysunku 40) - przedstawione jest na rysunku 41.



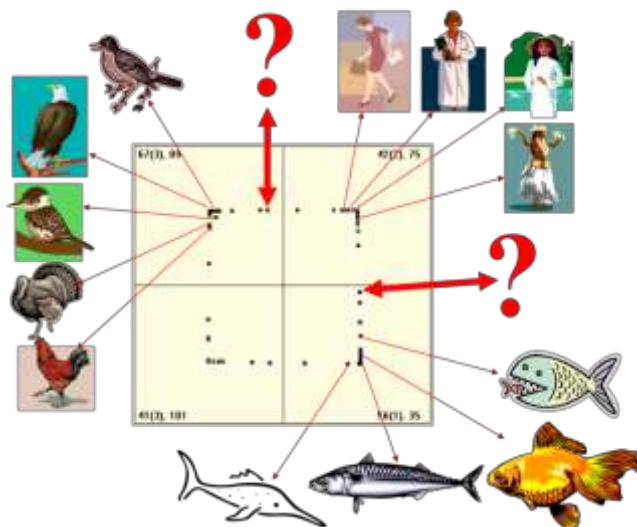
Rys. 41. Pośrednie stadium procesu uczenia – już odległe od pierwotnego chaosu (po lewej) ale jeszcze nie spetryfikowane w formie finalnych wzorców rozpoznawanych klas (po prawej)

W tym pośrednim stadium procesu samouczenia możemy (na podstawie wartości wag) zidentyfikować obiekty, które odpowiadają poszczególnym neuronom. Wyniki takiej wizualizacji przedstawiono na rysunku 42.



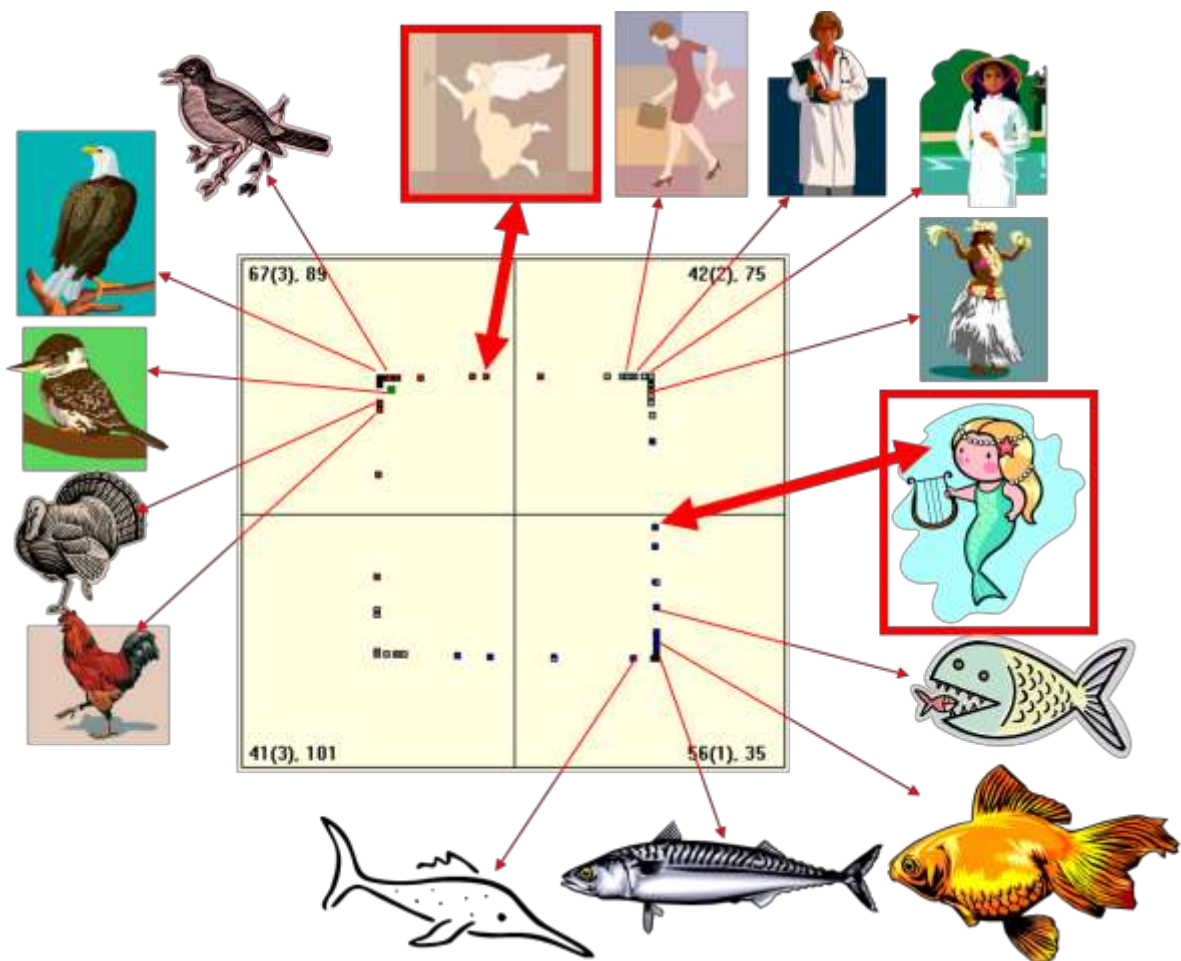
Rys. 42. Interpretacja wiedzy zawartej w różnych neuronach nie całkiem nauczonej sieci

Widać, że wiedza jest już gromadzona w poszczególnych neuronach, jednak nie podlegała ona jeszcze konsolidacji. Obserwując uważnie rysunek 42 (i wiele innych podobnych, gdyż opisany tu efekt autor wykrywał wielokrotnie w różnych formach) – można zauważyć neurony, które zadają się podlegać przyciąganiu przez więcej niż jeden tworzący się w sieci atraktor. Ich lokalizację pokazuje przykładowo rysunek 43.



Rys. 43. Neurony, które chcą rozpoznawać nie istniejące w rzeczywistości hybrydy

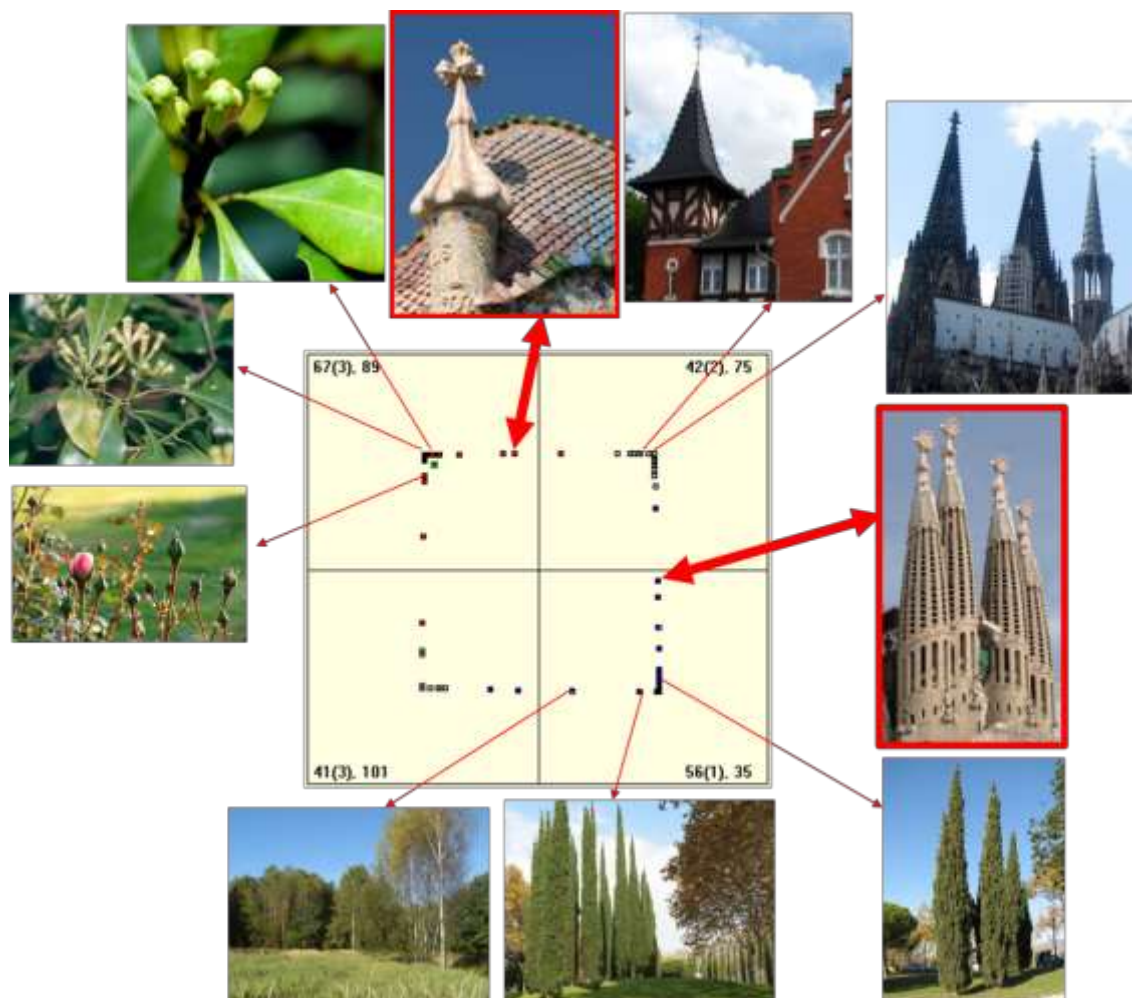
Jak się okazuje, są to neurony, które chcą rozpoznawać nie istniejące w rzeczywistości hybrydy – twory mające częściowo właściwości różnych istniejących obiektów, ale splecione i zmieszane w taki sposób, że można je interpretować na przykład tak, jak to pokazano na rysunku 44.



Rys. 44. Sieć neuronowa kreuje nowe byty – nie istniejące wśród obiektów uczących hybrydy

Opisany wyżej efekt był przedmiotem opracowań publikowanych w materiałach międzynarodowych konferencji [8] i [9], gdzie budził spore zainteresowanie jako jeden z rzadkich przykładów spontanicznego pojawiania się w systemie technicznym elementów fantazji, oderwania od rzeczywistości i swobodnej kreacji.

Przystępując do projektu Wirtualny Gaudi autor tego opracowania oczekiwał, że na podobnej zasadzie uda się – być może – uzyskać działanie sieci neuronowej naśladujące kreatywność umysłu Gaudiego, która ewidentnie była inspirowana elementami biologicznymi (pnie drzew, pąki, liście i kwiaty, muszle, winne grono itp.) łączonymi w genialny sposób z elementami architektury. Istotę koncepcji, którą usiłowano zrealizować, przedstawia rysunek 45.



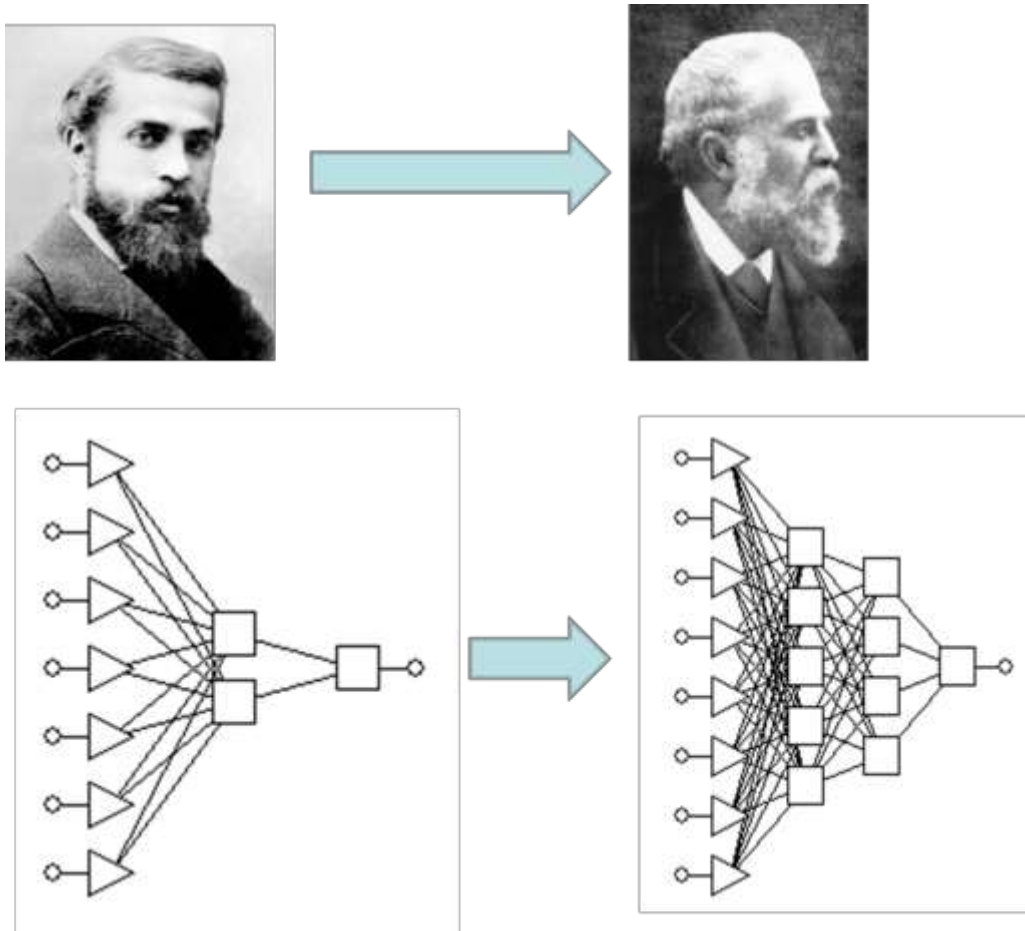
Rys. 45. Próba uzyskania w sieci neuronowej naśladownictwa procesu twórczego Antonio Gaudiego

Niestety, trzeba przyznać, że wszystkie podejmowane próby w tym zakresie kończyły się niepowodzeniem. Kreowane przez sieć hybrydy nie miały formy nadającej się do architektonicznej interpretacji.

7. Ewolucja możliwości twórczych

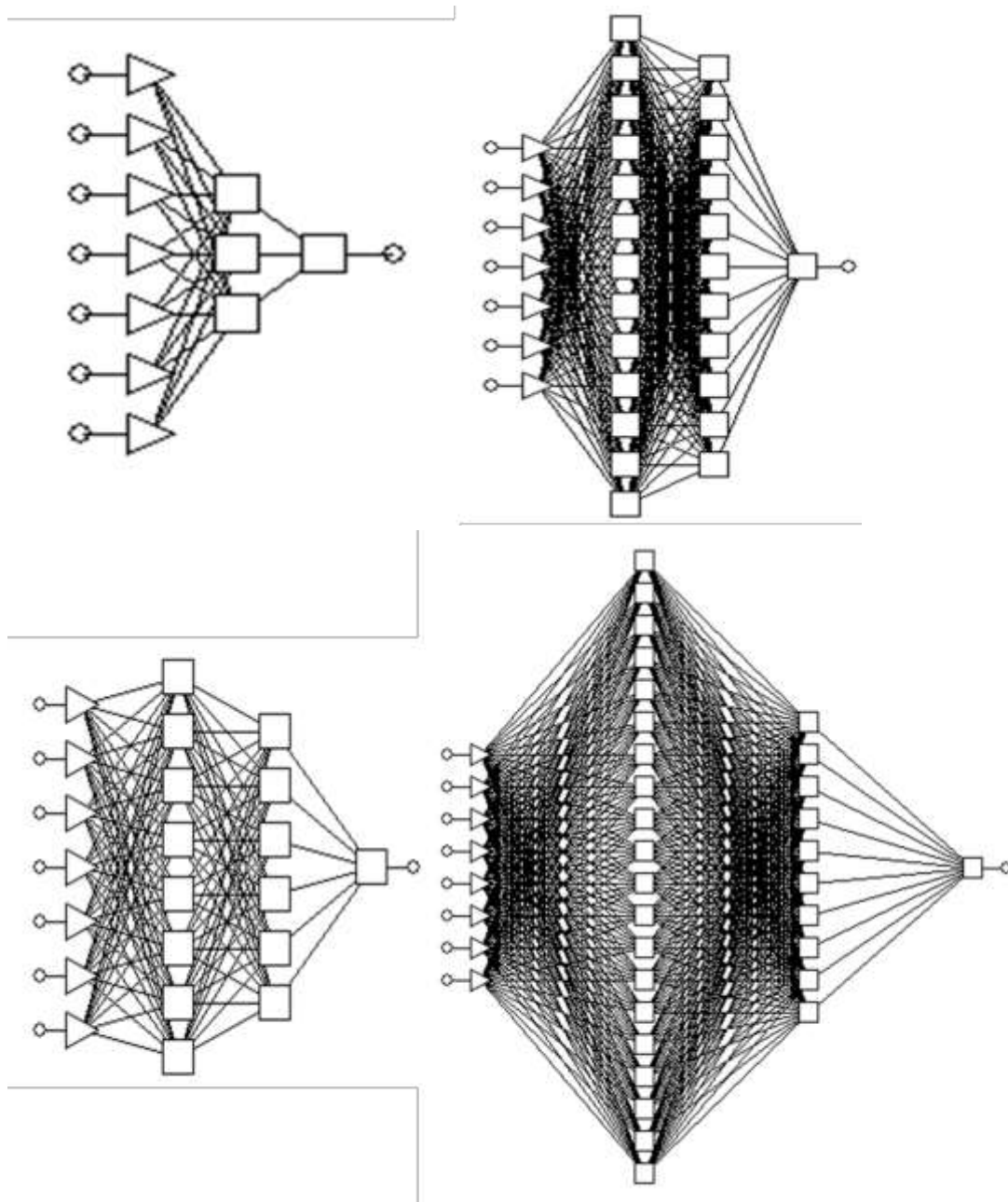
Jednym z założeń przyświecających projektowi Wirtualny Gaudi było założenie, że po udanym zamodelowaniu w sieci aktywności kreatywnej podobnej do tej, jaką wykazywał genialny umysł Gaudiego – będzie można wykorzystać znane techniki zwiększania możliwości sieci neuronowych poprzez rozwój jej struktury. Wiadomo z innych doświadczeń z sieciami neuronowymi – na przykład rozpoznającymi obrazy, że dodając do sieci kolejne elementy można zwiększać jej zdolności zapamiętywania i przetwarzania informacji. Na podobnej zasadzie zamierzano rozbudowywać sieci imitujące zdolności twórcze Gaudiego, dzięki czemu – jak sądzono - możliwe będzie zamodelowanie ewolucji jego możliwości kreacji nowych koncepcji obiektów architektonicznych, początkowo sterowane rzeczywistymi etapami jego talentu, a potem stanowiące ekstrapolację. Przypuszczano, że ekstrapolacja ta może doprowadzić do wygenerowania nieznanych wcześniej form architektonicznych będących swoista kontynuacją drogi twórczej Gaudiego, dramatycznie przerwanej jego tragiczną śmiercią 10 czerwca 1926 roku.

Istotę tego pomysłu przedstawia rysunek 46, na którym przejście od młodzięcego portretu Gaudiego do jego wizerunku w wieku dojrzałym skojarzone jest z sieciami neuronowymi realizującymi to samo zadanie, ale mającymi zdecydowanie zróżnicowaną strukturę – od prostej „młodszej” do złożonej „dojrzałej”.



Rys. 46. Rozwój i dojrzewanie twórcze Gaudiego modelowane przez wzrost stopnia komplikacji i wzrost zdolności przetwarzania informacji sieci neuronowej

Badano wiele przekształceń struktur sieci neuronowych tym się cechujących, że wszystkie miały tę samą liczbę wejść (ta sama ilość źródeł inspiracji twórczych) i to samo pojedyncze wyjście (koncepcja rozwiązania architektonicznego). Na rysunku 47 pokazano niektóre spośród badanych struktur (po lewej stronie każdego rysunku jest zawsze sieć neuronowa, która stanowiła punkt startowy rozważanej ewolucji, a po prawej strona struktura docelowa). Niestety nie udało się uzyskać oczekiwanego i pożądanego wzrostu możliwości twórczych badanych sieci.



Rys. 47. Sieci neuronowe o zwiększającym się stopniu złożoności mające modelować wzrost możliwości twórczych Gaudiego

8. Podsumowanie

Pomimo braku sukcesów zarówno w części prac dotyczącej modelowania kreatywności jak i w części dotyczącej ewolucji uzdolnień – prace warto kontynuować. Sieci neuronowe są ciekawym narzędziem pozwalającym w taki sposób modelować ludzki mózg, że można w nich zaobserwować procesy imitujące zróżnicowane zjawiska mentalne. Jeśli tą drogą udałoby się naświetlić dodatkowo procesy twórcze związane z powstaniem i rozwojem geniuszu kreatora tej miary, co Antonio Gaudi, to byłby to sukces o ogromnym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Niestety na obecnym etapie referowanych tu prac sukcesu tego osiągnąć się nie udało.

Bibliografia

1. Bengio Y.: Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2(1):1–127, 2009.
2. Bengio Y., Courville A., and Vincent P.: Representation learning: A review and new perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(8):1798–1828, 2013.
3. Dan Claudiu Cireşan, Ueli Meier, and Jürgen Schmidhuber. Transfer learning for Latin and Chinese characters with deep neural networks. In *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 1–6, 2012.
4. Pan S. and Q. Yang Q.: A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10):1345–1359, 2010.
5. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe w badaniach mózgu. Rozdział w książce: Dziedzicka-Wasylewska M. (Red): *Zaawansowane metody badania mózgu*, Instytut Farmakologii PAN, Kraków, 2011, str. 7 – 25.
6. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe i inne systemy neurocybernetyczne jako narzędzia informatyczne o ciekawych zastosowaniach na gruncie psychologii. Rozdział w książce: *Informatyka i psychologia w społeczeństwie informacyjnym*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011, str. 49 – 101
7. Tadeusiewicz R.: Modelowanie elementów systemu nerwowego z wykorzystaniem technik informatycznych, a zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych. Rozdział w książce: Francuz. P. (red.): *Na ścieżkach neuronauki*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2010, str. 13-34
8. Tadeusiewicz R., Izvorski A.: Learning in Neural Network - Unusual Effects of “Artificial Dreams”. In King et al. (Eds.): *Neural Information Processing, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4232, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2006, Part I, pp. 211 – 218
9. Tadeusiewicz R.: Using Neural Networks for Simplified Discovery of Some Psychological Phenomena. Chapter in the book: Rutkowski L. (et al., eds.): *Artificial Intelligence and Soft Computing*, LNAI 6114, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2010, pp. 104–123