

## Bioinspiracja, czyli jak człowiek czerpie z natury

**Zofia Borowska**

*Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,  
Wydział Biologii, Instytut Biologii Eksperymentalnej*

*E-mail: zofbor1@st.amu.edu.pl*

**Tutor: prof. UAM dr hab. Ewa Sobieszczuk-Nowicka**

*Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,  
Wydział Biologii, Instytut Biologii Eksperymentalnej*

**Słowa kluczowe** – *bioinspiracja, rozwiązania technologiczne, tensegralność, Plantoid, robot*

### **Wprowadzenie: bioinspiracja**

Przyroda ożywiona zaczęła się rozwijać na Ziemi około 4600 milionów lat temu. Okres ten nazwano biogenezą, ponieważ zainicjował różnicowanie żywych organizmów. Od tego czasu, poprzez różne, następujące po sobie ery, niosące za sobą ekstremalne zmiany klimatyczne i prowadzące do masowych wymierań gatunków, trwa ewolucja polegająca na jak najlepszym przystosowaniu się organizmów do zmian (West-Eberhard, 2003). Człowiek jest w tej historii najmłodszy. Stał się odrębnym gatunkiem dopiero 2,5 miliona lat temu. Ma więc za sobą najkrótszą drogę w ewolucji, ale jest gatunkiem, który może poświadczyć o własnej samoświadomości i inteligencji. Z tego powodu bardzo wysoko stawia się w hierarchii wśród organizmów żywych. Tymczasem rośliny i zwierzęta pojawiły się na Ziemi wiele milionów lat wcześniej i znalazły wiele rozwiązań oraz nauczyły się doskonale przystosowywać do zmiennych warunków środowiska. Człowiek zatem może uczyć się od nich i w połączeniu z własną inteligencją czerpać ze świata natury pomysły na rozwiązania technologiczne. Niedawno naukowcy nadali temu trendowi określenie bioinspiracji.

### **Inspiracja rozwiązaniami adaptacyjnymi organizmów**

Już w pierwszych etapach swojego rozwoju człowiek zauważał otaczające go zjawiska przyrodnicze i fizyczne próbując je naśladować. Wylądowania elektryczne podczas burz, które rozniecały ogień ogrzewający człowieka zainspirowały go do panowania nad tym żywiołem. Wraz z rozwojem kultury powstawały pierwsze cywilizacje, człowiek obserwując przyrodę budował schronienia najpierw dla siebie, a następnie wykorzystywał umiejętność budowania do celów religijnych i społecznych. W starożytności wybudował piramidy, które do dziś zadziwiają stabilnością, trwałością i sposobem konstrukcji. Metody wykorzystane przy tworzeniu tych budowli oparł

na prawach fizyki, które równie sprawnie działają w otaczającym nas świecie. Jak odkryli naukowcy z Uniwersytetu w Amsterdamie, sanie z blokami służącymi do budowy piramid były ciągnięte po piasku polewanym wcześniej wodą, co zmniejszając siłę tarcia i znacznie ułatwiało przesuwanie sań (Fall i in., 2014).

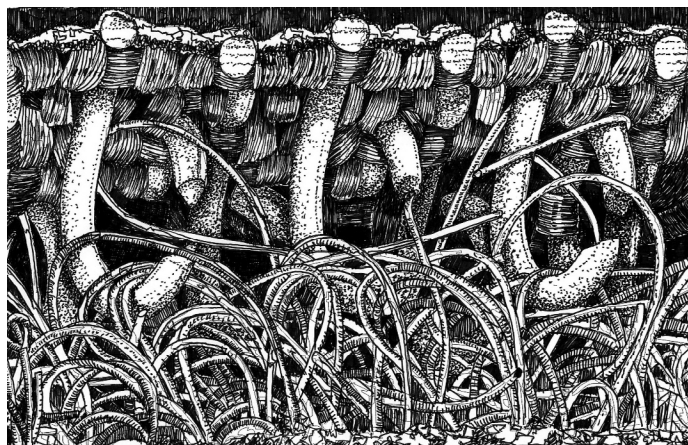
Prawo hydrostatyki głoścące, że jeśli na ciecz działają tylko siły powierzchniowe, to ciśnienie wywierane na ciecz zamkniętą w naczyniu jest przenoszona bez zmiany wartości na każdy element tej cieczy i ścianki zawierającego ją naczynia wykorzystano np. do budowy prasy hydraulicznej. Archetypowa prasa składała się z dwóch połączonych ze sobą cylindrów o różnych średnicach, wypełnionych cieczą. W każdym z cylindrów znajdował się tłok o odmiennej powierzchni.

Człowieka do szukania rozwiązań technologicznych inspirowały również rozwiązania adaptacyjne organizmów.

Wykorzystywał je do konstruowania np. tak praktycznych przedmiotów jak popularny rzep. *Arctium lappa* – gatunek lopianu powszechnie występujący w umiarkowanej strefie Europy i Azji. Rozprzestrzenia się on dzięki kolcom pokrywającym koszyczki kwiatowe. Kolce te wyposażone są w drobne haczyki przyczepiające się do pętelek utworzonych z sierści zwierząt tak trwale, że koszyczki mogą być przenoszone na duże odległości (redakcja Focus, 2012). Oddziaływaniu roślinnych haczyków ze zwierzęcą sierścią przyjrzał się dokładnie szwajcarski naukowiec George de Mestral. Jego materiałem badawczym zostały koszyczki lopianu wczepione podczas spaceru w sierść jego psa. W 1955 roku Mestral opatentował rzep pod nazwą Velcro (de Mestral, 1955). Wykorzystał do jego konstrukcji dwie nylonowe powierzchnie zaopatrzone w system haczyków i pętelek, które po zaczepieniu dają trwałe połączenie (Ryc. 1).

Przeniesienie niezwykłych rozwiązań występujących

w świecie organizmów miało miejsce również przy wynalezieniu syntetycznej taśmy gecko, czyli polimerowego materiału pokrytego szeregami nanorurek węglowych w układzie odwzorowującym rozmieszczenie wypustek na łapie gekona. Łapy tego małego gada zaopatrzone są w bardzo liczne, rozwidlające się wypustki zwane szczecinkami, umożliwiające szybkie i trwale przytwierdzenie do podłoża. Szczecinki składają się ze sztywnych włókien keratyny o właściwościach hydrofobowych (redakcja Focus, 2012). Ta obserwacja pozwoliła na opatentowanie taśmy o podobnych właściwościach i funkcjach, która sprawdza się lepiej w niesprzyjających warunkach mechanicznych (siły ścinające) niż dotychczasowe taśmy polimerowe. Dzięki układowi nanorurek na powierzchni taśmy jest ona w stanie oprzeć się siłom ścinającym o wartości 36 N/cm<sup>2</sup>, 4-krotnie przewyższającej możliwości, jakie mają łapy gekona (Ge i in., 2007).



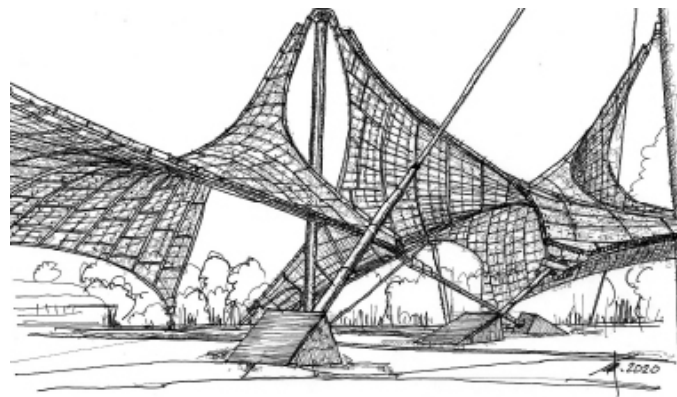
Ryc. 1. Struktura rzepa pod mikroskopem. Przybliżenie ok. 100 x [1]

Kształt samolotu jest kolejnym przykładem bioinspiracji. Inspirowany jest budową ptaków poruszających się w powietrzu. Ptaki przystosowały się do lotu wykształcając opływowy i bardzo ergonomiczny kształt korpusu oraz pióra, co pozwoliło na zmniejszenie oporów powietrza i na jego swobodny przepływ wzdłuż ciała ptaka (Durrani i Kalaugher, 2017). Obserwując samoloty można zauważyć analogię w ich budowie do wyglądu ptaka w postaci wąskiego dzioba i braku wystających elementów. Samoloty mają dużą, gładką powierzchnię nie stanowiącą oporu dla przepływu powietrza. Także konstrukcja skrzydeł samolotu przypomina tę ptasia i może dzięki temu wykorzystywać do lotu siłę nośną powstającą na skutek ruchu powietrza względem odpowiednio wyprofilowanych skrzydeł, nachylonych względem kierunku lotu pod pewnym kątem, zwanym kątem natarcia (Durrani i Kalaugher, 2017).

Kolejnym przykładem rozwiązania płynącego z natury jest pianka poliuretanowa, dla której stworzenia inspiracją był plaster miodu. Pianki dzięki swojej strukturze wzorowanej na tym wytworze pszczoł mają doskonałe właściwości termoizolacyjne oraz izolują akustycznie. Ponadto są wytrzymałe na szerokie spektrum temperatur (od -60°C do +100-130°C) (Kuhn i in., 1992).

Dobrym przykładem na to, jak człowiek stosuje technologię opierając się z kolei na wykorzystywanych prawach fizyki, przez inne niż on sam, organizmy są konstrukcje bazujące na zjawisku tensegralności. Nazwa pochodzi od angielskiego *tension*, czyli napięcie oraz *integrity* – całość. Zjawisko to jest powszechne w komórkach budujących euka-

ryonty. Polega na połączeniu struktur sztywnych i nieściśliwych z elementami odpornymi na rozciąganie, co zapewnia stabilizację całej struktury. Dzięki równoważeniu się napięć między elementami, mogą one tworzyć wytrzymałą całość. Właśnie taki jest szkielet komórki. Wchodzące w jego skład mikrotubule (elementy nieściśliwe) są połączone z cytoszkieletem aktynowym w formie gęstej sieci cienkich struktur. Zestawienie to zapewnia niezwykłą wytrzymałość i stabilność całej „konstrukcji”, jaką jest komórka (Ingber, 2003). Architekci zainspirowani tym rozwiązaniem stworzyli budynki, których konstrukcja oparta jest na zjawisku tensegralności. Takie budowle jak piramida Luwru (Batista, Velasco, Lima, 2015), Stadion Olimpijski w Monachium (Ryc. 2) (Gilewski i in., 2015), czy ogród botaniczny Eden Project w Wielkiej Brytanii (Pearman i in., 2003) mają wspólną cechę – połączone w ich konstrukcji sztywne elementy z cieńszymi, odpornymi na rozciąganie, takimi jak szkło.



Ryc. 2. Tensegralna konstrukcja przekrycia dachu Parku Olimpijskiego w Monachium [2]

Technologia ta ma również zastosowanie w przedmiotach codziennego użytku, na przykład oponie. Do jej konstrukcji użyto gumy jako materiału nieściśliwego oraz wypełniającego ją powietrza odpornego na rozciąganie. Osobno te elementy byłyby bezużyteczne i nie spełniłyby swojego zadania, jednak w połączeniu dają strukturę niesamowicie wytrzymałą. Są w stanie udźwignąć ciężar ponadtonowego pojazdu (Oliveira, Skelton, 2009).

Inną inspiracją człowieka jest soczewka ludzkiego oka. Soczewka jest wypukłą, przejrzystą formą mającą tę właściwość, że skupia rozproszone promienie świetlne na siatkówce, czyli warstwie światłoczułych komórek przekazujących sygnały do mózgu, co umożliwia widzenie (Horne, 1976). Proces ten zaobserwowano i wykorzystano między innymi w fotografii. Stworzono przyrząd optyczny imitujący strukturę w oku ssaka – szklaną soczewkę. Podobnie ma ona zakrzywioną powierzchnię roboczą. Strona, na którą pada światło jest wypukła, co umożliwia skupianie promieni. Obserwacja ta została poczyniona przez człowieka już 3600 lat temu w starożytnej Troi. W wykopaliskach na tych terenach odnaleziono wypukłe, wykonane z kryształu górskiego oszlifowane przyrządy. Podobne przyrządy, ale o tysiąc lat młodsze, znaleziono w asyryjskiej Niniwie (Plantzos, 1997). Pisane źródła historyczne, takie jak przekłady opisów Pliniusza Starszego, potwierdzają zastosowanie tego przedmiotu również w starożytnym Rzymie. Wspomniany jest oszlifowany szmaragd służący cesarzowi Neronowi przy

ogłądaniu walk na arenie (Pliniusz Starszy, 1857). Angielski mnich Roger Bacon w 1267 pisał w swojej pracy: *Epistola de secretis operibus artis et naturae* „Przyrząd taki byłby pożyteczny dla ludzi w podszym wieku oraz tych, którzy mają słaby wzrok” (Bacon, 1859). Soczewka znalazła zastosowanie jako przyrząd do czytania wraz z rozwojem druku, by później zostać udoskonalona do formy binokli i okularów. W 1608 roku soczewka posłużyła holenderskiemu optykowi Hansowi Lippershey do konstrukcji teleskopu, który później udoskonalili i szerzej wykorzystali włoski astronom Galileusz (Bell, 1922). Właściwości camera obscura, przyrządu zbudowanego z poczernionego wewnątrz pudełka z niewielkim otworem w jednej ścianie i matowym materiałem na przeciwległej, opisał arabski matematyk Alhazen z Basry (1572). Urządzenie udoskonalono później, gdy w 1550 roku Girolamo Cardano otwór zastąpił soczewką, która umożliwiła jeszcze lepsze skupienie światła (Gernsheim, 1986). Tak jak historia fotografii jest długa i obejmuje wiele innych udoskonalień, tak wszystkie współczesne aparaty mają w budowie obiektywu soczewkę.

Idea bioinspiracji poszerza się wciąż do tego stopnia, że naturalne procesy zachodzące w ludzkim organizmie są sztucznie odwzorowywane, by wspomóc na przykład regenerację kości. W tym celu czerpie się mechanizmy wykształcone przez naturę i zamyka się je w formie biodegradowalnego hydrożelu wstrzykiwanego w miejsce złamania, co wspiera odbudowę tkanki. Hydrożel ma w swoim składzie trójwymiarowe rusztowanie usztywniające macierz zewnątrzkomórkową oraz dostarcza czynników wzrostu promujących regenerację. Wspomaga to endogenną, czyli uwarunkowaną wewnątrznie odbudowę kości, ale może także przyczyniać się do różnicowania osteoprogenitorów, tak zwanych osteoblastów, czyli komórek kościotwórczych, kluczowych dla wzrostu i rozwoju tego rodzaju tkanki. Komórki te wytwarzają część organiczną macierzy kostnej (tzw. osteoidu) i odkładają fosforany wapnia. Innowacyjny materiał, nazwany **peptydoamin**, opracowany został przez naukowców z finansowanego przez UE projektu: Molecular design of biologically inspired soft materials for hard tissue regeneration (<http://molecular design of biologically inspired soft materials for hard tissue regeneration>, 2014). Do stworzenia **peptydoaminu** użyto biofosfonianów. Wykazują one duże powinowactwo do jonów wapniowych w hydroksyapatycie, głównym składniku istoty międzykomórkowej kości. Są zanurzone w politenku etylenu, a uzyskany w ten sposób hydrożel wykazuje odpowiedź na działanie wapnia i dzięki temu doskonale imituje tkankę i wspomaga procesy naturalnie w niej zachodzące. Fakt, jak sprawdzone są mechanizmy zaproponowane przez naturę, zweryfikowano podczas prób zastąpienia jonów wapnia innymi dwuwartościowymi jonami, które słabiej indukowały kościotworzenie. Na korzyść nowoczesnego materiału przemawia także fakt, że w próbach nie zahamował on aktywności osteoklastów (komórek kościogubnych) oraz nie wykazał cytotoksyczności w stosunku do nich, co mogłoby przyczynić się do nadaktywności i zaburzenia równowagi w odtwarzaniu się kości.

## Od androida do plantoida

Człowiek od początku swojego istnienia czerpał rozwiązania z natury odwzorowując mechanizmy zaobserwowane w przyrodzie. Podczas gdy prwa rządzące światem mierzy swoją miarą i w antropomorficznym wymiarze postrzega rzeczywistość, rośliny mają mu do zaoferowania zupełnie inny system rozwiązań. Niedoceniany świat roślin dostarcza nam biopolimerów i biokomponentów paliw pochodzenia roślinnego wyprodukowanych w ilości ponad 130 tys. ton w 2015 roku wg szacunku OECD-FAO (Borychowski, 2012). Zaletą tych komponentów jest ich odnawialne źródło, podczas gdy 95% zapotrzebowania energetycznego zaspokajają paliwa kopalne, których zasoby są ograniczone (Agarwal, 2007). Ponadto, czerpanie energii z roślinnej masy nie generuje tak ogromnego śladu węglowego i szkodliwych gazów jak paliwa kopalne. Ważną dla nas cechą roślinnych materiałów jest też ich biodegradowalność, czyli możliwość mikrobiologicznego rozkładu i ponownego włączenia w cykl obiegu materii. Jest to bardzo istotne w czasie gdy po oceanie dryfuje wielka pacyficzna plama śmieci złożona z niezagospodarowanych odpadów - syntetycznych polimerów, zajmująca powierzchnię 1,6 miliona km<sup>2</sup> (Lebreton i in., 2018), co stanowi prawie 3-krotną powierzchnię Francji (Liu, 2018).

Rośliny przyjmują również inną strategię reakcji na zmienne bodźce środowiska. Obejmuje ona rozproszony system odbioru i przetwarzania bodźców, oparty na współpracy między poszczególnymi częściami organizmu roślinnego. Nie ma tu centralnego sterowania reakcją.

Robot, słowo inspirowane fantastycznonaukowym utworem R.U.R. *Rossum's Universal Robots* (1923), zostało użyte po raz pierwszy przez czeskiego dramaturga Karela Čapka. Począwszy od premiery utworu w 1921 roku, upowszechniany zaczął być obraz robota jako repliki człowieka, humanoidalnej, mechanicznej postaci wykonującej ciężką automatyczną pracę. Jednak idea ta przyświecała już Leonardowi da Vinci, który w 1495 roku opracował plan automatu ludzkiego pokroju. Idea autonomicznego robota-insekta, została zobrazowana ostatnio w odcinku *Znienawidzeni* popularnego serialu *Czarne lustro* (2011) przedstawiającego w krzywym zwierciadle rzeczywistość, która może nadejść wraz z rozwojem technologii. W czasach, gdy przez niszczytelką działalność człowieka wymiera populacja pszczół, te pożyteczne zwierzęta zostają zastąpione przez społeczność insektycydów. Jednak, jak się okazuje, skrywają swoją ciemną stronę i przez luki w ich systemowych zabezpieczeniach można je wykorzystać do szerzenia zła.

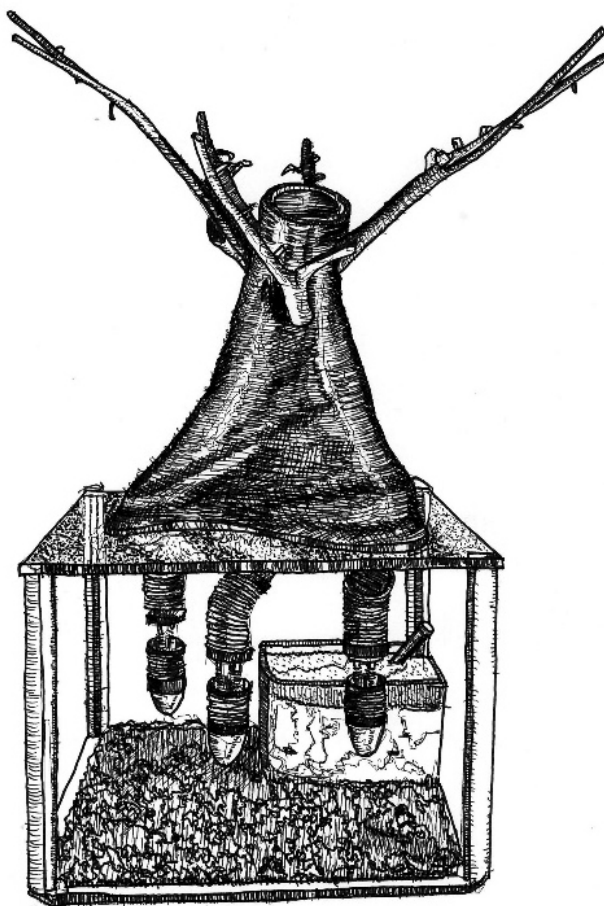
Jednak jeśli wyobrażenie robota jako androida czy insektycyda niesie za sobą pozytywne przesłanki, które ułatwiają człowiekowi pracę, to zupełnie pomijany lub nawet nie dostrzegany jest potencjał rośliny jako pierwowzoru robota.

Wzorowanie automatów na roślinach stwarza zupełnie nowe perspektywy ze względu na ich unikalne cechy. Mają niskie zapotrzebowanie energetyczne, budowę modułową, wykonują pasywne ruchy, a ich wzrost jest ukierunkowany (Mancuso, 2018). Tryb życia wielokomórkowych roślin jest osiadły. Wiąże się z tym duża elastyczność ewolucyjna. Nauczyły się wysoce precyzyjnie i skutecznie do-

stosowywać do zmian warunków środowiska. Elastyczność w życiu osobniczym zawdzięczają ruchom wzrostowym pozwalającym w ukierunkowany sposób reagować na bodźce. Niezwykle rozbudowany system korzeniowy zapewnia stabilność w podłożu, ale także skutecznie pobiera wodę z solami mineralnymi dzięki włóknikom wielokrotnie zwiększającym powierzchnię absorpcji. Duży potencjał stanowi modułowa budowa i powtarzalność modułów roślin. Pojedyncza multipotencjalna komórka zawiera zestaw genów, dzięki którym jest zdolna odtworzyć cały organizm macierzysty. Właściwość tę zaobserwował już francuski przyrodnik Jean-Henri Fabre, pisał on: „*U zwierząt podział oznacza w większości przypadków śmierć, u roślin natomiast rozmnożenie*” (1916). Z genetycznego punktu widzenia organizm rośliny nie stanowi indywidualum, ale raczej „kolonię” wielu powtarzalnych jednostek. Z perspektywy robotyki stwarza to szansę na wydłużoną żywotność zespołu podjednostek w porównaniu do samodzielnych indywidualów. Stworzono struktury autonomiczne, to znaczy wykorzystujące mechanizmy inspirowane roślinami, ale także potrafiące czerpać informacje z otoczenia i ukierunkowanie działać w odpowiedzi na nie, co jest już wyższym stopniem specjalizacji takich urządzeń. Połączenie tych cech zostało zastosowane w robocie – Plantoidzie, który naśladuje zachowanie roślin. Do stworzenia nazwy posłużyła fuzja dwóch słów oddająca charakter urządzenia: *plant* (z ang. roślina) i *eidos* (z gr. wygląd, forma). Ojcem Plantoida (Ryc. 3) jest Stefano Mancuso, autor książki *Rewolucyjny geniusz roślin* (2018), którego zafascynował potencjał drzemiący w roślinach. Spróbował połączyć cechy je wyróżniające i zastosować w autonomicznym urządzeniu. Jego idea znalazła poparcie w osobie Barbary Mazzolai, robotyczki z Włoskiego Instytutu Technologii, która zajęła się techniczną stroną przedsięwzięcia. Ich projekt zakładał stworzenie robota naśladującego czynność rośliny i przypominającego ją wyglądem.

Podstawową funkcją robota miałby być wzrost “korzeni” oparty na energii dostarczanej przez inne części automatu, a akumulowanej w sposób również inspirowany procesami przeprowadzanymi przez roślinny organizm. Mancuso i Mazzolai twierdzą, że urządzenie doskonale sprawdziłoby się w surowych warunkach Marsa. Dzięki odtworzeniu przystosowań rośliny-roboty “miały by się rozprzestrzenić na Czerwonej Planecie i zapuścić korzenie w jej podłożu. Mogłyby w ten sposób badać glebę, podczas gdy ogniwa fotowoltaiczne w nadziemnych pseudoliściach zaopatrywałyby je nieustannie w prąd”, pisze Mancuso w swojej książce (Mancuso, 2018). W pracy nad Plantoidem powstało techniczne wyzwanie konstrukcji “korzenia”, którego wzrost i działanie miałyby wzorować się na roślinnych rozwiązaniach. Naturalny mechanizm opiera się na dwóch procesach: podziale komórek merystematycznych stożka wzrostu korzenia oraz wydłużaniu komórek w strefie elongacji. Skonstruowany przez Mancuso i Mazzolai sztuczny korzeń imituje te procesy. W konstrukcie został wbudowany zbiornik z tworzywem dostarczającym materiału budującego “korzeń” oraz przyspieszeniomierz, czujnik wilgotności, czujniki chemiczne i siłowniki osmotyczne, dzięki którym udało się odtworzyć zdolności sensoryczne korzenia. Procesy integruje zainstalowany mikrosterownik, dzięki czemu zakończyło się sukcesem odzwierciedlenie

naturalnego zachowania korzenia, czyli penetracji podłoża (Russino i in., 2013). Problem “fabryk”, jakimi są liście udało się rozwiązać dużo łatwiej. Zaopatrzone “rośliny” w ogniwa fotowoltaiczne dostarczające energii do zachodzenia wszystkich procesów przy wykorzystaniu światła (Mancuso, 2018). Plantoidy mogą znaleźć zastosowanie na przykład w eksploracji innych planet, dzięki wykorzystaniu podstawowej właściwości roślin, jaką jest zdolność do wykształcania przystosowań w surowych warunkach. Jako organizmy pionierskie funkcjonują w wysoce nieprzyjaznych okolicznościach rozwijając strategie przetrwania. Tego typu urządzenia sprawdzą się też przy odkrywaniu gruntów nadających się pod uprawy np. w rejonach pustynnych, gdyż roboty te skuteczniej niż inne urządzenia potrafią wskazywać skażenie chemiczne gleby, zdeponowane w niej składniki odżywcze oraz źródło wody. Pojawił się nawet pomysł wykorzystania ich w medycynie np. w formie elastycznego endoskopu, który delikatnie poruszałby się wewnątrz ciała nie powodując podrażnień i uszkodzeń tkanek.



Ryc. 3. Konstrukcja Plantoida autorstwa S. Mancuso i B. Mazzolai [3]

### Podsumowanie

Wszystkie przytoczone powyżej przykłady doskonale ilustrują jak człowiek od początku swojego istnienia inspirował się przyrodą. Organizmy w toku ewolucji wykształciły wiele przystosowań umożliwiających im przetrwanie w zmiennym środowisku. Kolejni konstruktorzy czerpali pomysły od roślin, zwierząt oraz zjawisk fizycznych stojących u podstaw funkcjonowania tych organizmów, konstruując narzędzia opierające się na rozwiązaniach natury. Tworzone urządzenia i materiały znalazły już dawno zastosowanie w technice, przedmiotach codziennego użytku, transporcie,

medycynie, budownictwie, architekturze, a dziś w eksploracji kosmosu. Można śmiało stwierdzić, że bioinspiracja odegrała i wciąż odgrywa znaczącą rolę w rozwiązaniu ludzkich technicznych problemów. Człowiek od momentu swojego pojawienia się na Ziemi, konstruuje własne technologie, podgląda naturę.

## Literatura

Agarwal, A. K., 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (3), 233-271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>.

Alhazen z Basry, 1572. *Opticae Thesaurus Alhazeni Arabis libri septem,...*, redakcja Friedrich Risner, Basel; wznowione Nowy Jork, 1972.

Bacon, R., 1859. *Fr. Rogeri Bacon Opera Quaedam Hactenus Inedita*, redakcja J. S. Brewer, Nowy Jork, Cambridge University Press.

Batista, E., Vellasco, P., Lima, L., (red.), 2015. *Tubular structures XV: Proceedings of the 15th International Symposium on Tubular Structures*, Leiden, CRC Press Inc.

Bell, L., 1922. *The telescope*, Boston, Library of Alexandria.

Borychowski, M., 2012. Produkcja i zużycie biopaliw płynnych w Polsce i na świecie - szanse, zagrożenia, kontrowersje. *Roczniki Ekonomiczne Kujawsko-Pomorskiej Szkoły Wyższej w Bydgoszczy*, 5, 39-59. [za:] Organisation for Economic Co-operation and Development – Food and Agriculture Organization, 2011. *Agricultural Outlook 2011–2020*. Paris, OECD Publishing.

Čapek, K., 1923. *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*, przekład Paul Selver, Garden City New York, Double Doubleday, Page & Company.

*Czarne lustro*, sezon 3, reż. Ch. Brooker, wyst. J. Plemons, C. Milioti, J. Simpson, Netflix, 2011.

Durrani, M., Kalaugher, L., 2017. *Kudłata nauka*, Kraków, Społeczny Instytut Wydawniczy "Znak".

Fabre, J. H., 1916. *Z życia owadów. Pisma wybrane z „Souvenirs entomologiques”*, przekład Zofia Z. Bohuszewiczówna, Maria Górka, Warszawa, Henryk Lindenfeld. Skład Główny u E. Wendego i S-ki.

Fall, A., Weber, B., Pakpour, M., Lenoir, N., Shahidzadeh, N., Fiscina, J., Wagner, C., Bonn, D., 2014. Sliding Friction on Wet and Dry Sand. *Physical Review Letters*, 112 (17), 175502. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.175502>.

Ge, L., Sethi, S., Ci, L., Ajayan, P. M., Dhinojwala, A., 2007. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (26), 10792-10795. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0703505104>.

Gernsheim, H., 1986. *A Concise History of Photography*, Nowy Jork, Dover Publications.

Gilewski, W., Klosowska, J., Obara, P., 2015. Applications of tensegrity structures in civil engineering. *Procedia Engineering*, 111, 242-248. doi: [10.1016/j.proeng.2015.07.084](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.084).

Horne, D. F., 1976. *Lens mechanism technology*, Uniwersytet Michigan, Crane, Russak.

Ingber, D. E., 2003. Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology. *Journal of Cell Science*, 116 (7), 1157-

1173, doi: [10.1242/jcs.00359](https://doi.org/10.1242/jcs.00359).

Kuhn, J., Ebert, H. P., Arduini-Schuster, M. C., Büttner, D., Fricke, J., 1992. Thermal transport in polystyrene and polyurethane foam insulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35 (7), 1795-1801. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90150-Q](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90150-Q).

Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep*, 8:4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>.

Liu, M., 2018. *Great Pacific Garbage Patch now three times the size of France*. [online], <https://edition.cnn.com/2018/03/23/world/plastic-great-pacific-garbage-patchintl/index.html> [Dostęp:11.05.2020]

Mancuso, S., 2018. *Rewolucyjny geniusz roślin*, Wrocław, Wydawnictwo Bukowy Las.

de Mestral, G., *patent amerykański*, US2717437A, Wrzesień 13, 1955.

*Molecular design of biologically inspired soft materials for hard tissue regeneration*, 2014. FP7-PEOPLE - Specific programme „People” implementing the Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities (2007 to 2013).

Oliveira, M. C., Skelton, R. E., 2009. *Tensegrity Systems*, Nowy Jork, Springer Science & Business Media.

Pearman, H., Grimshaw, N. i partnerzy, Whalley, A., 2003. *The architecture of Eden*, Uniwersytet Kalifornijski, Eden Project Books in association with Grimshaw.

Plantzos, D., 1997. Crystals and Lenses in the Graeco-Roman World. *American Journal of Archaeology*, 101 (3), 451-464. doi: [10.2307/507106](https://doi.org/10.2307/507106).

Pliniusz Starszy, 1857. *The Natural History of Pliny*, Tom 6, przekład John Bostock, Henry Thomas Riley, Londyn, H. G. Bohn.

Redakcja Focus, 2012. *Z natury nowoczesne* [online], <https://www.focus.pl/artykul/z-natury-nowoczesne> [Dostęp: 01.08.2019]

Russino, A., Ascrizzi, A., Popova, L., Tonazzini, A., Mancuso, S., Mazzolai, B., 2013. A novel tracking tool for the analysis of plant-root tip movements. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8 (2). doi: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/2/025004>.

West-Eberhard, M. J., 2003. *Developmental Plasticity and Evolution*, Oksford, Oxford University Press.

[1] Rys. Borowski, K., 2020.

[2] Rys. Borowski, K., 2020.

[3] Rys. Borowski, K., 2020 na podstawie Innovative Robotic Artefacts Inspired by Plant Roots for Soil Monitoring. <https://www.plantoidproject.eu/> [Dostęp: 21.06.2020]

## Notka o Autorce

Obecna studentka II roku biotechnologii Wydziału Biologii UAM. Jej zainteresowania koncentrują się wokół ścisłych nauk: biologii molekularnej i fizyki. Esej powstał w wyniku współpracy z Tutorką, wobec której autorka wyraża wdzięczność za wkład czasu w pracę nie tylko nad tekstem, w ramach programu KRAB na WB. Autorka dziękuje także Autorowi rysunków, które zostały stworzone specjalnie na potrzeby eseju.