

Archivolta 1(61)2014 s. 56-61

Budynek, który zmienia się w czasie

Optymalizacja topologiczna w projektowaniu architektonicznym

Time varying building

Topology optimization in architectural design

Sebastian Białkowski

Instytut Architektury i Urbanistyki, Politechnika Łódzka

Słowa kluczowe: architektura, projektowanie cyfrowe, optymalizacja topologiczna

Keywords: architecture, digital designing, topology optimization

Streszczenie

Celem projektu oraz towarzyszących mu badań i eksperymentów było stworzenie przestrzeni, dostosowującej się strukturalnie do zmian zachodzących w związku z ciągłym rozwojem budynku w trakcie jego użytkowania, a zwłaszcza pod wpływem zmiany obciążeń. W tym celu zaadaptowano Metodę Elementów Skończony do analizy statycznej budynku, oraz wywodzącą się z niej Optymalizację Topologiczną, której celem jest jak najefektywniejsze rozmieszczenie materiału w przestrzeni. W trakcie badań nad formą obiektu, stworzone algorytmy, zostały przetestowane w kilku etapach, przed ich docelowym użyciem do wyliczeń konstrukcji budynku. Z danych otrzymanych w trakcie optymalizacji, zostało wyodrębnione pole wektorowe naprężeń, w każdym punkcie kontinuum, na podstawie którego, inny algorytm oparty na systemie wieloagentowym śledził ścieżkę przepływu sił celem aplikacji materiału. Struktura projektowanego obiektu oparta została na module, przypominającego cegłę, jednak geometrycznie odpowiadającemu kształtem pół-foremnej bryle ściętego ośmiościanu. W celu uproszczenia procesu projektowego stworzona została program typu CAD, dzięki któremu każdy użytkownik obiektu będzie mógł spersonalizować własną przestrzeń.

Abstract

The purpose of the project and the accompanying research and experimentation was to create a space, adapting to structural changes occurring in relation to continuous development of the building during its use, especially under the influence of load changes. For this purpose, Finite Element Method was adapted for building static analysis, and derived from it Topology Optimizations, whose aim is the most efficient distribution of material in space. During the research on the form of the building, created algorithms have been tested in several stages, before their intended use of in the calculations of building construction. From the data received during optimization, has been extracted stress vector field at every point in the continuum of material, on the basis of which, a different algorithm based on a multi agent system, traced the path of the forces with application of the material in the same time. Structure of created object, was based on the module, similar to the brick, but geometrically corresponding to the shape of a truncated octahedron. In order to simplify the design process, has been developed CAD software, so that each building resident will be able to personalize their own space.

Zadaniem projektowym było opracowanie koncepcji domu mieszkalnego, który będzie się zmieniał w swojej strukturze przestrzennej dostosowując się do sposobów realizacji potrzeb jego mieszkańców. Konwencjonalne rozumienie budynku, jego architektury i konstrukcji, zazwyczaj sprowadza się do wyobrażeń statycznej bryły zapewniającej wygodę i dającej poczucie bezpieczeństwa. W tym myśleniu nie uwzględnia się jednak potrzeby dostosowywania obiektu do zmian funkcjonalnych oraz częstych zmian aranżacji jego przestrzeni wewnętrznej. A jest to dużym ograniczeniem w czasach, gdzie z roku na rok zmieniają się trendy i sposoby zaspokajania potrzeb zarówno na poziomie jednostki jak społeczeństwa.

Rewolucji przemysłowa przyniosła nowe materiały i techniki budowlane. Wynalezienie i stali, a potem żelbetu przyczyniło się do powstania konstrukcji ramowych i słupowo-belkowych, a następnie szkieletowych, które pozwalały już na bardziej swobodne aranżacje przestrzeni wewnętrznych niż tradycyjne budownictwo uzależnione od układu ścian nośnych. Można zatem zadać pytanie, jakie zmiany w strukturze budowli może jeszcze przynieść rewolucja informatyczna, która objęła już niemal wszystkie domeny ludzkiej aktywności. Wzrastające tempo zmian nie omija także budowli. W momencie kiedy dany budynek przestanie spełniać określone wymagania najczęściej koszt jego modernizacji przewyższa koszt budowy nowego obiektu spełniającego nowe wymagania użytkowe i środowiskowe.

Reaktywna morfogeneza

Dzięki rozwojowi technik informatycznych, architekci coraz częściej sięgają do cyfrowych narzędzi wspomagających projektowanie. Inżynieria, architektura i informatyka, kiedyś działy nauki idące swoimi torami, zaczynają tworzyć nierozłączną parę, kreując nowy rodzaj projektantów, myślących nie tylko o formie z wizualnego punktu widzenia, ale również dostrzegający proces jej powstawania, ewolucji i dostosowywania się do nowych sposobów zaspokajania potrzeb.

Projekt obiektów, które ewoluują w czasie nazwany "Load Reactive Morphogenesis" opracowany został w DIA DESSAU na przełomie 2012/13. W projekcie tym podjęty został problem zabudowy na terenie aktywnym sejsmicznie jakim jest Istanbuł w Turcji. Celem projektu oraz towarzyszących mu badań i eksperymentów było stworzenie przestrzeni, dostosowującej się strukturalnie do zmian zachodzących w związku z ciągłym rozwojem budynku w trakcie jego użytkowania, a zwłaszcza pod wpływem zmiany obciążeń.

ALGORYTMY. Do uzyskania satysfakcjonujących wyników, które byłyby zmienne w czasie, nieodzowne było wykorzystanie zaawansowanych algorytmów matematycznych, będących nieodzownym elementem architektury parametrycznej.

W budowaniu odpowiedniego algorytmu pomocna okazała się także Metoda Elementów Skończonych (MES) będąca jednym z podstawowych narzędzi komputerowego wspomaganie badań naukowych i analiz inżynierskich. Metoda ta znajduje szeroki zakres zastosowań i zdobywa coraz większą popularność wśród architektów projektujących cyfrowo nowatorskie formy. Polega ona na dyskretyzacji, podziale skomplikowanego modelu matematycznego na skończoną ilość prostych elementów, utworzenie równań różniczkowych opisujących problem w każdym elemencie, a następnie ich rozwiązanie. Dodatkową zaletą algorytmu, oprócz możliwości rozwiązania złożonych problemów dzięki prostym równaniom, jest jego adaptacyjność.

Innym narzędziem numerycznym, wywodzącym się bezpośrednio z metody MES, jest Optymalizacja Topologiczna (OT). Skrypt ten pozwala na efektywne rozłożenie materiału konstrukcyjnego w pewnej domenie przestrzeni, przy założonych warunkach obciążeń i podparć, celem uzyskania jak najbardziej, wytrzymałych i lekkich struktur. Silnikiem takiej optymalizacji, jak w tym przypadku, może być technika ruchomych asymptot czy algorytm genetyczny. Jednak, niezależni od wybranej techniki, proces przebiega w ten sam sposób.

Pierwszym etapem jest tzw. Preprocessing, w którym to model podlega dyskretyzacji, najpierw zakładane są warunki materiałowe, obciążenia i podparcia. Następnie przechodzi się do fazy Processingu, w którym to obliczany jest model statyczny konstrukcji dzięki MES. Następnie wynik jest optymalizowany w sposób zależny od wybranej techniki. Zmienną optymalizowaną jest gęstość materiału, która zmienia się od wartości 0 (brak materiału) do 1 (pełne właściwości materiału), w danym punkcie kontinuum materiału. Ponieważ zastosowany algorytm jest iteracyjny, dąży on do osiągnięcia domeny gęstości materiału 0 i 1, bez wartości pośrednich.

MATERIAŁ. Idea obiektu zmieniającego w czasie swoją strukturę pod wpływem zmian obciążeń, narzuca pewne wymagania materiałowe jak i technologię pozwalającą na przemieszczanie materiału w przestrzeni. Struktura budynku oparta została na module, geometrycznie odpowiadającym kształtem pół-foremnej bryle, tu ściętego ośmiościanu, który przejęto jako rodzaj cegły. Aby umożliwić pre-

kształcanie struktury w czasie, elementy stanowiące budulec łączą się ze sobą w sposób mechaniczny, zatraskowy, nie ma tu tradycyjnych spoin murarskich, ani klei budowlanych. Daje to możliwość łatwego przemieszczania ich w obrębie konstrukcji obiektu, co przyczynia się do zmiany wyglądu budynku w czasie. Dodatkowo, wyposażone są one w prosty mikro chip (BCU – Base Computing Unit), działający wedle zadanych instrukcji. Ten mikro chip wysyła jednocześnie dane to głównego komputera (MCU – Main Computing Unit) zarządzającego budynkiem.

Zostały opracowane dwie koncepcje. Pierwsza z nich przewiduje użycie BCU tylko i wyłącznie do zbierania danych o umiejscowieniu Jednostki w przestrzeni, w celu odtworzenia pełnego analitycznego modelu dla MES i OT przez MTU. Drugie rozwiązanie bliższe jest idei Metody Elementów Skończonych. Otóż, każda jednostka BCU, zgodnie z ideą MES-u, oblicza swoją część algorytmu, a następnie wynik wysyłany jest do MTU w celu złożenia danych w jeden model. W ten sposób otrzymuje się swego rodzaju klastr obliczeniowy.

Rejestrowanie struktury budynku w postaci cyfrowych danych może pomóc w przeglądaniu historii budynku, pomagać w bieżącym szukaniu usterek, uszkodzonych modułów, czy odtworzyć budynek po jakimś zdarzeniu losowym. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość ochrony budynku przed trzęsieniami ziemi, które są dużym problemem w Istambule, bądź innym mieście zlokalizowanym na terenach aktywnych sejsmicznie. W razie wystąpienia wstrząsów, główny komputer jest w stanie przeanalizować bieżącą sytuację naprężeń jakie powstają w modułach i zdecydować jak mają się one zachować. Jedno z rozwiązań przewiduje możliwość zapadnięcia się małej części budynku, w momencie kiedy wywierała by ona niekorzystny wpływ na resztę budowli. Inne dopuszcza jednostkowe rozłączanie modułów celem utworzenia swego rodzaju dylatacji między nimi zezwalając na swobodną pracę struktury, przy jednoczesnym eliminowaniu niebezpiecznych naprężeń występujących między nimi.

Badania i eksperymenty

W trakcie badań nad formą obiektu, sporządzone algorytmy optymalizacyjne zostały przetestowane w kilku etapach, przed ich docelowym użyciem do wyliczeń konstrukcji budynku.

Pierwszy test został przeprowadzony w środowisku 2D, z jednym miejscem przyłożenia obciążenia i podparcia będących w stosunku do siebie osiowo. Otrzymany wynik to tradycyjna kratownica Mishella, potwierdzająca prawidłowe działanie skryptu. Kolejne testy zostały przeprowadzone w środowisku trójwymiarowym 3D. Warunkiem inicjalizacji dla algorytmu była domena materiału o wymiarach 5 x 5 x 4,5 m obciążona powierzchniowo od góry. Układ podparć rozmieszczony był w pięciu różnych konfiguracjach. Wyniki symulacji ukazały pewną zasadę rozkładu naprężeń w przestrzeni dla większości przypadków. Łatwo można było zaobserwować układ rozgałęzień, przypominające drzewa, czy łuki typu łańcuchowego, które to poprzez swoją geometrie przenoszą najlepiej obciążenia pionowe.

Dzięki pomyślnym wynikom badań na modelu 3D, kolejnym etapem prób i testów była adaptacja algorytmów w skali budynku. Przygotowano testowy budynek w którym to rozmieszczono w określonej sekwencji kilka typów mieszkań. Jako dane wejściowe do optymalizacji, ze stropów zebrano obciążenie w formie skupionej, rozmieszczono stopy fundamentowe oraz dodatkowo stworzono scenariusz wzrostu i rozwoju budynku w czasie, aby ocenić jego adaptacyjność. Istotą symulacji było sekwencyjne dodawanie do algorytmu kolejnych mieszkań na podstawie scenariusza w celu weryfikacji i dostosowania konstrukcji do nowych warunków. Jednocześnie po raz pierwszy zaaplikowano moduł jednostki w miejscach prawidłowego rozkładu materiału. Symulacja ta pokazała, jak istotny wpływ na układ konstrukcyjny budynku ma rozkład obciążeń występujący w danym momencie czasowym. Zmiana schematu sił w jednej części budynku miała realny wpływ na całą strukturę. Jednakże, test ten pokazał pewne ograniczenia OT, a mianowicie czas obliczeń. Celem uzyskania wysokiej jakości wyników, należałoby zwiększyć rozdzielczość dyskretyzacji modelu, co przekłada się na czas obliczeń.

Budynek kształtują użytkownicy

W trakcie opracowywania pomysłu zmieniającego się w czasie budynku, było jasne, że największy wpływ na jego zmiany będą mieli ludzie, a co za tym idzie, jak będą chcieli zorganizować swoją przestrzeń użytkową.

W celu uproszczenia procesu projektowego stworzona została program, dzięki któremu każdy użytkownik obiektu będzie mógł zorganizować własną, spersonalizowaną przestrzeń. Założono, że program ten pozwoli na porównywanie projektów wszystkich użytkowników, badanie w jakie interakcje będą one wchodziły w każdym mieszkaniu mieszkaniem, oraz jakie są możliwości kreowania dalszych rozwiązań przestrzennych.

Każdy zatem mieszkaniec będzie mógł w dowolnym momencie wywołać program w swoim komputerze, włączyć projekt do którego ma dostęp i zmienić go celem dostosowania do nowych wymagań. Każde zmiany w programie, przekładać się będą na zmiany w istniejącej fizycznie konstrukcji budynku. Jednakże, nie każde rozwiązanie będzie akceptowane przez program. Nie mogą mieć miejsca zmiany powodujące np. przysłonięcie sąsiadowi okien, czy zabudowanie jego wyjścia z mieszkania. Z tego chociażby powodu należałoby wprowadzić czynnik ludzki jakim byłby główny architekt obiektu, aby weryfikował projekty użytkowników, przed wprowadzeniem danych do OT. Taka aplikacja danych jest prostym programem typu CAD, w całości napisanym w Processingu, który jest implementacją środowiska Java.

Program ten został podzielony na dwa podstawowe moduły. Pierwszy z nich to widok całościowy Budynku wraz ze wszystkimi mieszkaniami i otaczającymi go innymi obiektami architektonicznymi. W tym miejscu użytkownik podejmowałby decyzje o ulokowaniu swojej nowej przestrzeni użytkowej. Po jej wybraniu, uruchamiałyby się drugi moduł, przenoszący projektanta w tryb szczegółowego projektowania. Wybrana przez niego przestrzeń zostaje podzielona na siatkę sześcianów o boku równym 50 cm. Jest to jednostka projektowa.

Proces twórczy użytkownika może być prowadzony w różny sposób. Program dostarcza bowiem gotowe narzędzia masowego zaznaczania przestrzeni o kształcie prostopadłościanu, lub strefy proponowanych zmian. Można też użyć wirtualnego pędzla do szybkiego zapelniania wybranego na ekranie obszaru, albo manualnie zaznaczać wybrane sześciany. Ponadto, przestrzenie budynku, w zależności od przeznaczenia, zostały podzielone na kategorie i oznaczone odpowiednio kolorami w celu ich łatwej identyfikacji w programie. W momencie zakończenia projektowania, projekt zapisywany jest na głównym komputerze MTU, i po uprzednim zatwierdzeniu, dane aplikowane są do algorytmów OT, celem wykonania konstrukcji dla nowych wymagań przestrzennych wskazanych przez użytkownika.

Opracowywany docelowo budynek mieszkalny zlokalizowany został w centrum Istanbuhu, niedaleko wieży Galata. Podzielono go na dwie części: część poziomą stałą i niezmienną oraz część naziemną, podlegającą częstym zmianom strukturalnym. W obliczeniach statycznych przyjęto obciążenia największe z możliwych, jakie mogą wystąpić przy maksymalnym rozwoju naziemnej części mieszkalnej, często modyfikowanej przez użytkowników. Kontrola zmian obciążeń byłaby możliwa dzięki wprowadzaniu danych pochodzących od mieszkańców.

Proces rozwoju budynku wyglądałby, z goła podobnie, jak w przypadku budynku testowego z dwiema ważnymi zmianami.

Pierwsza z nich to schemat obliczania obciążenia. Tym razem obciążenie obliczane było na podstawie powierzchni całego mieszkania, czyli łącznie ze ścianami, sufitem i obciążeniami użytkowymi.

Drugą ważną zmianą były dane otrzymane w procesie optymalizacji. W tym wypadku jako rezultat procesu pobrane zostało pole wektorowe naprężeń w każdym punkcie przestrzeni zamiast danych dotyczących gęstości materiałów. Miało to na celu dokładniejsze rozmieszczanie jednostek konstrukcyjnych. Aby zautomatyzować cały proces, napisany został specjalny algorytm oparty na zasadzie systemu wieloagentowego. Skrypt ten, na podstawie pola wektorowego naprężeń otrzymanego z OT, tworzy ścieżki przepływu naprężeń między obciążeniem a podparciem. Jednocześnie w trakcie śledzenia tego przepływu odczytywana jest wielkość naprężeń w danym

miejscu i układ jednostek konstrukcyjnych, taki aby przeniosły one zadane obciążenia. W ten sposób algorytm szuka najefektywniejszego rozkładu materiału na podstawie danych otrzymanych z OT. Wynikiem pracy algorytmu są struktury przypominające gałęzie drzew podtrzymujące przestrzenie w których przebywa człowiek.

Próby zastosowania narzędzi numerycznych w projektowaniu formy architektonicznej mogą przyczynić się nie tylko do optymalizacji konstrukcji, pod względem mechanicznym, ale również do uzyskania optymalnego zużycia materiału budowlanego, jego recyklingu, czy wynajdywania form unikatowych dla danego problemu. Adaptacyjność tych algorytmów może przyczynić się do spojrzenia na architekturę, która jest zarazem strukturą statyczną i dynamiczną.