

Simulacija in optimizacija vozliščnega izenačevanja virtualnih 3-D elementov za proste oblike strešnih konstrukcij

Simon Kulovec¹, Leon Kos² in Jožef Duhovnik³

¹Fakulteta za strojništvo, LECAD lab, Univerza v Ljubljani.
E-pošta: simon.kulovec@lecad.fs.uni-lj.si

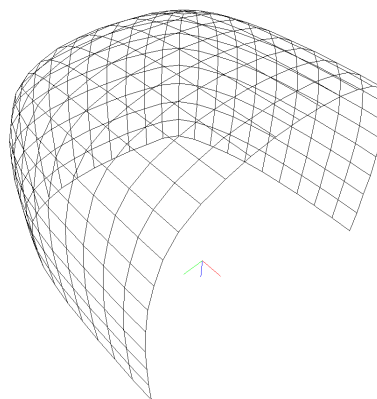
Simulation and Optimization of Virtual 3-D elements for Freeform Architectural Structures

In architectural design, freeform structures by definition represent an area of full creativity that does not limit the architect to the use of regular shapes. The building blocks of such structures are planar faces. The connection between the design intent and the fabrication still presents a challenge when creating a support structure that is geometrically viable and should possess certain aesthetic, fabrication, thermal and strength requirements. Our approach uses beams of constant height, providing a parallel offset mesh suitable for a constant distance between the top and bottom closure layers. A compensation of different edge heights is proposed with variable beam offsets. Quad-dominant meshes with conical properties require optimization of the beam offset in vertices to align all beams at approximately equal heights.

1 Uvod

Trend trenutnih geometrij se nagiba h konstrukcijam prostih oblik, ki so poljubne in nepravilnih oblik. Mrežne strukture že obstoječih konstrukcij prostih oblik so sestavljene predvsem iz trikotnih mrežnih elementov. V primerih ko konstrukcija sledi glavnim ukrivljenostim zasledimo tudi štirikotne elemente, čeprav v veliko manjšem obsegu. Zaradi manjše porabe materiala, kar posledično vodi k zmanjšanju stroškov ter lažje izdelave konstrukcije se osredotočimo na izdelavo konstrukcij prostih oblik z uporabo dominantno štirikotnih in kombiniranih mrežnih struktur [1]. Ker imamo opravka s štirikotnimi mrežnimi elementi je potrebno najprej zagotoviti planarnost [2] in koničnost [3] mrežne strukture [4], za katero se izdelava tudi simulacijo premika vozlišč za doseganje kriterijev, ki jih določajo pokrivne ploskve. Omenjene konstrukcije trenutno še vedno predstavljajo izziv med prosto obliko konstrukcije in izdelavo podporne konstrukcije, ki bo zadostila vsem trdnostnim ter vizuelnim kriterijem glede na obremenitve in potrebna zagotovitev čimbolj enakih datajlnih prehodov v vozliščih. Pri izvedbi konstrukcije uporabimo nosilne elemente konstantne višine. Nosilni elementi so postavljeni tako, da zagotovimo konstantno oddaljenost med zgornjo in spodnjo pokrivno površino konstrukcije. Zaradi zagotavljanja konstantne oddaljenosti med pokrivnima pločevinama imamo različne robne

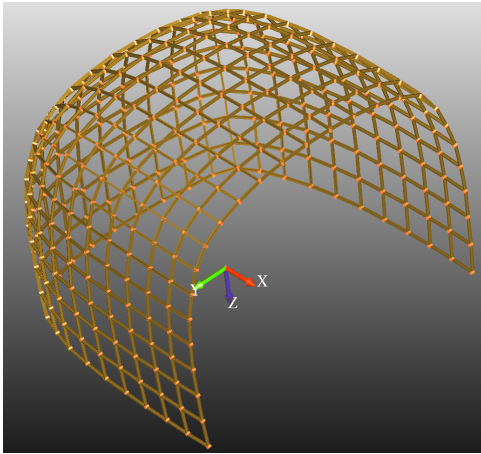
odmike nosilcev. Nosilci se v vozlišču nahajajo na različnih višinah. Izdelava se simulacijo izdelave CAD modela poljubnih konstrukcij, s katerim se želi predvideti možne napake in predvideno stanje konstrukcije preveriti predno se konstrukcija fizično izdelava. Ideja je, da se v vozliščih zagotovi enakost datajlnih prehodov ter čimbolj izenači višine nosilcev v vozliščih, s čimer se zagotovi večjo statično stabilnost konstrukcije ter omogoči fizično izvedbo vozliščnega spoja in nosilcev ter omogoči odtekanje vode iz vozlišč. Posledica optimizacijskih premikov nosilcev v vozliščih je spreminjanje oddaljenosti nosilcev od začetnega roba, kar se kompenzira z dodajanjem različnih debelin izolacije in se simulira v namensko razvitem CAD modelirniku.



Slika 1: Planarna in konična mrežna struktura, optimizirana z Lagrange-Newton metodo, ki temelji na sekvenčni kvadratični optimizaciji [5].

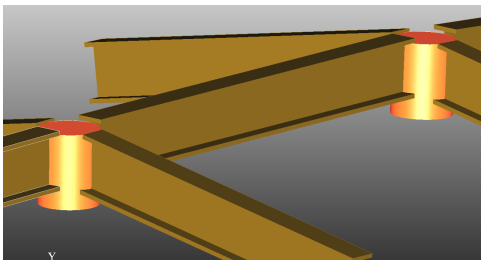
2 Definiranje problema

Slika 2 predstavlja CAD model izdelan glede na planarnost in konično optimizirano mrežno strukturo. Na sliki 2 je predstavljen CAD model podkonstrukcije, ki je sestavljena iz vozliščnih elementov, ki so v našem primeru valji ter nosilnih elementov, za katere smo izbrali poenostavljene I profile. Podkonstrukcija je izdelana glede na pokrivno pločevino, katera mora zagotavljati odvod vode iz vozlišč ter za izolacijo zahteva konstanten odmik med pokrivno pločevino ter nosilno podkonstrukcijo. Vozlišča so postavljena glede na maksimalno oddaljeno



Slika 2: CAD model podkonstrukcije za konično in planarno mrežno strukturo.

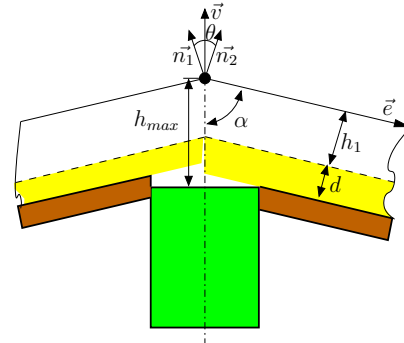
višino med vozliščem in nosilnim elementom posameznega vozlišča. Višinske razlike v vozliščih so različne, ideja je, da se zagotovi enakost detajlnih prehodov med profili in vozliščem glede na posamezno vozlišče (glej sliko 3 in 4), vendar če se analizira oddaljenosti posameznega profilnega elementa na obeh straneh pridemo do ugotovitve, da ima v večini primeri nosilec na obeh straneh, razen če ne gre za zelo ostre kote, približno enako oddaljenost od vozlišča. Glede na prejšnjo ugotovitev se izdelali optimizacijski algoritem, ki te višinske razlike izenači ter simulira v virtualnem okolju. Virtualno okolje smo izdelali za odkrivanje napak na konstrukciji pred fizično izvedbo. Pogoj je tudi ohranitev prvotne oblike mrežne strukture, ki jo poda arhitekt. Za nazornješi prikaz odstopkov je dodana slika 3 z dvema vozliščema iz katere so že vizuelno razvidni različni odmiki nosilec-vozlišče, ki je simulirana z našim CAD programom. V



Slika 3: Prikaz naleganja nosilcev na vozlišče za primer dveh vozlišč.

poglavju 4 je izdelana grafična analiza višinskih odstopkov nosilec-vozlišče za celotno mrežno strukturo. S po-optimizacijskim algoritmom izenačevanja višinskih razlik med profilom in vozliščem dobimo različne postavitve nosilnih elementov od začetnih robov, kar pomeni, da bomo morali te premike kompenzirati z dodatnimi elementi oz. izolacijo med profilom in pokrivno pločevino. Zaradi postopka avtomatizacije izdelave posameznih profilnih elementov in vozlišč, to naj nebi imelo bistveni vpliv pri izdelavi konstrukcije. Ima pa izenačevanje profilnih elementov v posameznem vozlišču bistven vpliv pri zmanjšanju dodatnih sil in momentov v vozlišču, kar nam

omogoči manjšo uporabo materiala ter statično stabilnost posameznega spoja ter posledično celotne konstrukcije. Namensko razvito CAD virtualno okolje za virtualizacijo poljubnih konstrukcij prostih oblik. Omogočen je tudi prikaz virtualnega modela spoja med nosilci in vozliščem po optimizaciji.



Slika 4: Prezrez naleganja dveh nosilnih elementov na vozlišče. Prikaz konstantne oddaljenosti h_1 med nosilnimi elementi in pokrivno pločevino konstrukcije. Zaradi različnih naklonov konstrukcije pride do različnega višinskega naleganja med nosilnim elementom in vozliščem.

3 Optimizacijski algoritem

Z optimizacijskim algoritmom izvedemo izenačevanje višinskih razlik med nosilci in vozliščnim elementom v posameznem vozlišču je nujno potrebno, saj se s tem izognemo dodatnim silam in momentom, ki se pojavijo v vozlišču. Tako naredimo konstrukcijo statično stabilnejšo ter omogočimo fizično izvedbo povezovanja nosilcev z vozliščnimi elementi.

3.1 Določitev cenilne funkcije

Po operaciji pozicioniranja posameznega vozlišča glede na maksimalno oddaljenost nosilca glede na izbrano vozlišče se določi oddaljenost profilov za posamezno vozlišče glede na katere se v nadaljevanju tvori cenilna funkcija. Cenilna funkcija se tvori tako, da za vsako vozlišče v izbrani mrežni strukturi upošteva tudi vsa sosednja vozlišča, da ne pride do porušitve sosednjih vozlišč.

$$F(h) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (|h_{i,j} - h_{i,j+1}| + |h_{i,j} - h_{i+1,j}|) \quad (1)$$

kjer je $i = 1 \dots n$ in $j = 1 \dots m$. Prvi del cenilne funkcije predstavlja višinsko razliko $h_{i,j}$ (indeksa i in j višinske razlike h popisujeta i -to vozlišče in j -ti profil izbranega vozlišča) med profili enakega vozlišča, drugi del cenilne funkcije pa predstavlja povezavo trenutnega vozlišča s sosednjimi, kar pomeni, da primerja oddaljenost nosilca v vozlišču na obeh koncih nosilca z ozirom na stanje sosednjih vozlišč (glej sliko 4). Zato optimizacijo imenujemo kot globalno.

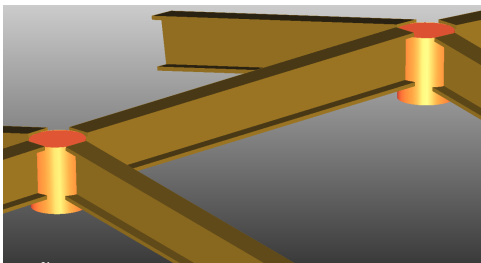
Indeks $i = 1 \dots n$ predstavlja število vozliščnih elementov n za poljubno izbrano mrežno strukturo. Indeks $j = 1 \dots m$ označuje število nosilnih elementov posameznega vozlišča. V našem primeru je $m = 4$, z izjemo v

robnih vozliščih, ker imamo dominantno štirikotno mrežno strukturo.

4 Rezultati

Z globalno optimizacijo poskušamo zagotavljati enake oddaljenosti med nosilci in vozliščnimi elementi ob ohranjanju začetne oblike mrežne strukture. Optimizacija je potrebna, ker želimo konstrukcijo narediti statično stabilno. Ker nosilce premikamo na enake oddaljenosti vozliščnega elementa se s tem znebimo dodatnih sil in momentov. Nastale premike profilov se kompenzira z uvedbo izolacije različnih debelin (glej sliko 4), po optimizaciji $d \neq konst.$ ampak je različen za posamezen nosilec. Pri optimizaciji se uporabi knjižnico *Intel Math Library* in metodo *Sequential Quadratic Optimization* [5] ter za simuliranje virtualnega modela, s katerim pregledujemo možne napake še pred fizično izvedbo konstrukcije *Open-Cascade* [7].

4.1 Vizualizacija optimizirane CAD podkonstrukcije

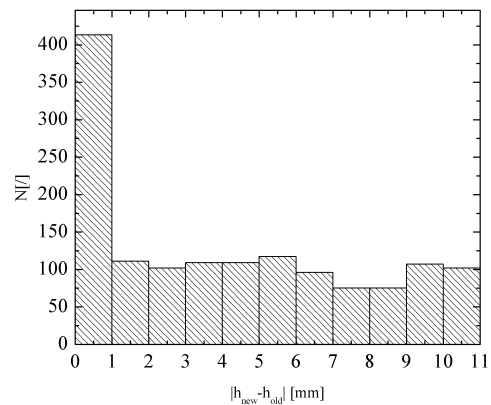


Slika 5: Višinsko optimizirana CAD mrežna struktura za primer dveh vozlišč.

Na sliki 5 so prikazani vizualni rezultati optimizacije izenačitve odmikov nosilcev od vozliščnega elementa za izbrano mrežno strukturo. Prikazana vozlišča na sliki 5 so enaka kot v primeru pred optimizacijo. Že iz primerjave CAD modelov se jasno vidi razliko pred (glej sliko 3) in po (glej sliko 5) optimizaciji. Odmiki nosilcev v izbranem vozlišču so po optimizaciji skoraj enaki. Z uvedbo optimizacije pride do premikov nosilnih elementov v smeri robnih normal nosilcev, zato bo potrebno odmike pri fizični izvedbi konstrukcije kompenzirati npr. z različno debelino izolacije. Ker bi se postopek izdelave posameznih elementov konstrukcije avtomatiziral, različna debelina izolacije nebi predstavljala večjega problema izdelave, predvsem če upoštevamo, da smo konstrukcijo na ta račun naredili statično precej stabilnejšo.

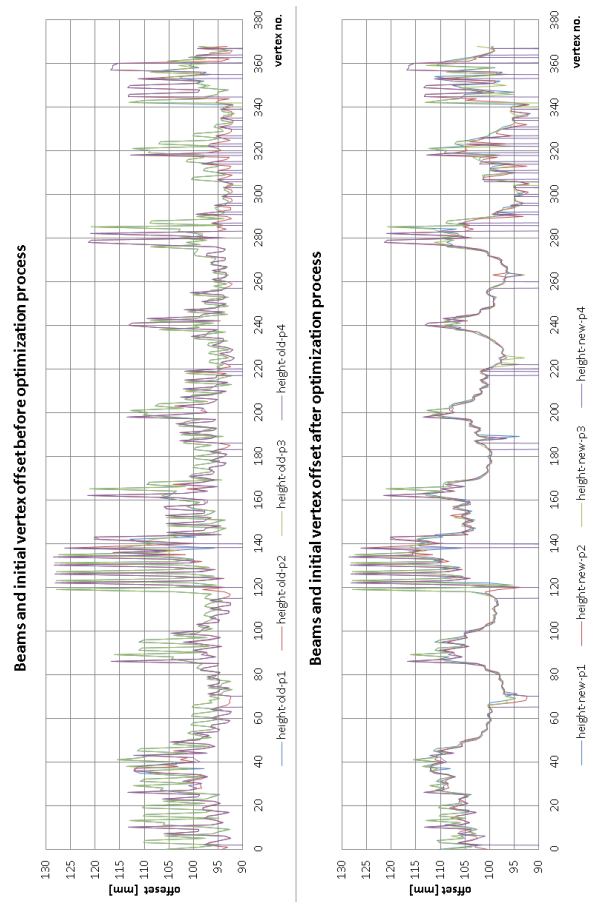
4.2 Predstavitev višinskih razlik pred in po optimizaciji

Cenilna funkcija je sestavljena iz vsote višinskih razlik med nosilcem in vozliščnim elementom za vsako vozlišče v izbrani mrežni strukturi (glej enačbo 1). Uporabimo omejitve, ki določa interval za kolikor se lahko posamezen nosilec premakne, kar je [0-10]mm. Cenilna funkcija v 10 iteracijah doseže maksimalen padec in nato doseže skoraj končno konvergenco po 15 iteracijah in se bistveno ne spreminja do 50 iteracije. Histogram (glej sliko 6)



Slika 6: Razlika oddaljenosti posameznega profila.

prikazuje absolutne spremembe višinskih razlik posameznega profila neodvisno od vozlišča za izbrano mrežno strukturo. Največ premikov nosilcev pribl. 410 je bilo v območju 1mm. Na grafu (glej sliko 7) so prikazani



Slika 7: Oddaljenost nosilec-vozlišče za vsak profil v posameznem vozlišču pred in po optimizaciji.

višinski odstopki posameznega nosilca glede na vozlišče za vsa vozlišča mrežne strukture. Drugi graf (glej sliko 7-spodaj) prikazuje stanje višin med nosilcem in vozliščem po optimizaciji. Razvidno je, da se intervalna razlika višinskih razlik med nosilci enakega vozlišča po optimizaciji občutno zmanjša. Idealna optimizacija bi bila, če bi se vse krivulje na grafu prekrivale, kar bi pomenilo, da

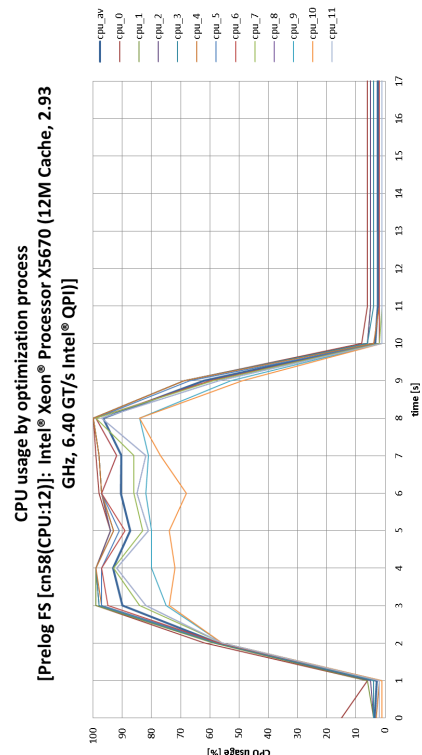
so višinske razlike posameznega profila za vsa vozlišča enake. Če najprej pogledamo zgornji graf na sliki 7 opazimo, da najmanj razdalja enega profila v poljubno izbranemu vozlišču izstopa od ostalih. Višinska odstopanja so v rang 10 odstotkov povprečne višinske oddaljenosti profilov v vozlišču. Razpon višinskih oddaljenosti je v intervalu [90, 125]mm. Višine posameznih profilov, ki padejo pod vrednost 90mm so enake nič. Z optimizacijo želimo zblížiti višinske razlike nosilcev za vsa vozlišča tako, da se ohrani prvotno obliko izbrane mrežne strukture. Na sliki 7(spodaj) je razvidno, da se krivulje višinskih oddaljenosti nosilcev od vozlišča v primeru skoraj vseh vozlišč, po optimizaciji, popravijo. Na nekaterih predelih se kvazi idealnega stanja ne da doseči, predvsem na predelih zavojev in robov mrežne strukture. Poleg tega je pri nekaterih krivuljah (glej sliko 7-spodaj) razviden znaten padec višine. To se pojavi na vozliščih, ki imajo le tri nosilce, predvsem so to robna vozlišča. Ta podatek za nas ni relevanten in ga ne upoštevamo. Zaključimo lahko, da je razporeditev višinskih oddaljenosti med nosilci in vozliščem na izbrani mrežni strukturi po optimizaciji izboljšana.

4.3 Paralelizacija z uporabo OpenMP

Izdela se analiza obremenjenosti 12 procesorjev (*Intel[®] Xeon[®] Processor X5670*) na enem vozlišču superračunalnika PRELOG, FME, UL (SLO) in je prikazana na sliki 8. Eno vozlišče vsebuje 12 procesorjev, zato se pričakuje polna obremenjenost vseh, ter ohranitev oziroma zmanjšanje časa optimizacije. Do polne obremenitve procesorjev od začetka optimizacije sta potrebni 2s. Optimizacija se izvaja 5s, kjer so vsa jedra obremenjena približno enako, to pomeni obremenjenost v intervalu [70, 80] procentov. In grafa na sliki 8 se vidi, da je izkoriščenih vseh 12 procesorjev, kar je za skoraj 50 procentov hitreje kot pri optimizaciji na štirih jedrih

5 Zaključek

Pokazali smo izvedbo simulacije in optimizacije CAD konstrukcije za poljubno izbrano mrežno strukturo z uporabo *Intel Math Kernel* knjižnice in *OpenMP* [8]. Z optimizacijo se poskuša zagotoviti izenačenje različnih višinskih razlik med nosilci in vozliščnim elementom za sleherni vozlišče. S simulacijo CAD modelov pa se poskušamo izogniti napakam pred fizično izvedbo konstrukcije. Z optimizacijo cenilne funkcije, ki je sestavljena iz vsote višinskih razlik med nosilci in vozlišči, se doseže konvergenco po 50 iteracijah. Izdelali smo analizo začetne in optimizirane mrežne strukture, da se ugotovi ali je konstrukcija po optimizaciji izboljšana ter ali mrežna struktura ohranja začetno obliko (glej sliko 5). Po optimizaciji dvignemo povprečno oddaljenost profilov za 3mm. Nato postopek optimizacije paraleliziramo [8] (uporaba *OpenMP*) ter izdelamo primerjavo vpliva večjega števila procesorjev na hitrost reševanja problema izenačevanja višinskih razlik. Za primerjavo se uporabi računalniške kapacitete s širimi in dvanajstimi jedri. Ugotovitev je, da se z uporabo večih procesov hkrati zmanjšuje čas optimizacije vendar ne linearno (glej sliko 8). Če se število procesorjev povečamo za faktor tri, se čas optimizacije zmanjša za polovico. S povečevanjem procesorskih moči



Slika 8: Obremenitev na dvanajstih procesorjih (PRELOG, FME, UL (SLO) Compute Node).

ne moremo nadaljevati v nedogled, ker se pri zadostnem številu procesorjev čas ne zmanjšuje več.

Literatura

- [1] Kulovec, S., Kos, L., and Duhovnik, J. Mesh Smoothing with Global Optimization under Constraints. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 2011, InPress DOI:10.5545/sv-jme.2010.113.
- [2] W. Wang, Y. Liu, D. Yan, B. Chan, R. Ling, and F. Sun: Hexagonal meshes with planar faces. *Tech. Rep. TR-2008-13, Department of Computer Science, The University of Hong Kong*, 2008.
- [3] H. Pottmann, and J. Wallner: The focal geometry of circular and conical meshes. *Advances in Computational Mathematics* 29, 3, 249–268, 2008.
- [4] H. Pottman, A. Asperl, M. Hofer, and A. Kilian: *Architectural Geometry*. Bentley institute Press, Exton, Pennsylvania USA, 2008.
- [5] K. Madsen, H. B. Nielsen, and O. Tingleff: *Optimization with constraints*, 2nd Edition. IMM, Technical University of Denmark, 2004.
- [6] L. Kos, S. Kulovec, and J. Duhovnik: Support structure optimization for freeform architectural design. *TMCE 2010*, April 12-16, Ancona, Italy. Delft: University of Technology, str. 829–840, 2010.
- [7] CAD kernel library OpenCascade-<http://www.opencascade.org/org/doc/> [11.9.2011].
- [8] B. Chapman, G. Jost, and R. van der Pas: *Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, Massachusetts Institute of Tehnology, 2008.