

3D lasersko skeniranje kot podporno orodje za akustično sanacijo stare industrijske hale

(3D laser scanning as an assisting tool for acoustic renovation of an old industrial hall)

Urban Kavka¹, Rok Prislan¹

¹InnoRenew CoE

E-pošta: urban.kavka@innorenew.eu

Abstract

Lately it is becoming common to consider acoustics within complete renovation of a building. When the place is meant to serve as a venue for variety of different events, designing room acoustics is a necessary step to check. The acoustic renovation of main hall has been studied considering different requirements of various social events at Creative quarter Barutana (org. Kreativna četrt Barutana). The basic process was assisted from the start with 3D laser scanning to acquire accurate positions of microphones and sound sources, which speeded up the measurements as well as capturing the overall geometry of the room. Operating with point cloud came with difficulties but opened many possibilities for development of assisting tools and plug-ins that could specifically help in case of detecting microphones.

1 Uvod

Industrijska območja, ki je so zgradila v 19. stoletju in začetku 20., so se proti koncu prejšnjega tisočletja množično opuščala. Tako so nastala številna degradirana območja, ki so problematične ne le zaradi neizkoriščenosti stavbnega fonda ampak ravno tako predstavljajo ekološko grožnjo. Z namenom revitalizacije to vrstnih območij je potrebno industrijske komplekse celostno prenoviti in vanje smiselno vnesti nove dejavnosti ter uporabnike. Primer revitalizacije degradiranega industrijskega kompleksa je tudi zapuščeno kovinarstvo na območju nekdanje tovarna smodnika Kemijske industrije Kamnik. Stavba kovinarstva, poimenovana tudi *šlosarija Barutana* se je v zadnjih letih razvijala v Kreativno četrt Baturana, znotraj katere se bodo v prihodnosti odvijali raznoteri kulturni in družabni dogodki, od koncertov, gledališč in predavanj do sejmov in razstav. Zasnova Kreativne četrti Barutana (v nadaljevanju KČB) je v svojem jedru prostor skupnega soustvarjanja, kjer lahko kdorkoli iz širše javnosti organizira različne javne dogodke. Stavba ponuja manjše nekdanje pisarne in večjo industrijsko avlo, ki bi se ob ustrezni prenovi lahko uporabljali kot pisarne, ateljeji oziroma prireditveno prizorišče. Širok nabor dogodkov predstavlja izziv za akustično sanacijo glavne industrijske hale. Sanacija je pogojena tudi s točnostjo meritev obstoječega stanja prostorske akustike kot tudi dimenzij prostora. S tem namenom smo preverili

uporabo 3D laserskega skenerja za precizne meritve leg mikrofonov in zvočnih virov ter natančne geometrije prostora.

2 Teorija

Akustična sanacija je ustaljen proces, pri katerem se najprej izmeri trenutno stanje prostorske akustike obravnavanega prostora, nato pa z analitičnimi metodami ali simulacijami vpelje in preveri potencialne rešitve. Končni korak akustične sanacije je vgradnja akustičnih elementov ter opravljanje meritev v izboljšanjem stanju. Za osnovne meritve se je izbralo meritve hrupa ozadja, odmevnega časa in impulznega odziva.

2.1 Akustični parametri

Impulzni odziv (ang. *impulse response*) prostora nam omogoča določitev več akustičnih parametrov prostora. Najbolj poznan akustični parameter, odmevni čas, tako določimo s postopkom, ki ga je razvil nemški akustik Schröder kot alternativo metodi prekinjenega hrupa [1]. Za določitev odmevnega časa najprej razdelimo meritve na posamezne frekvenčne pasove, nato pa se filtriran signal kvadrira in obratno integrira, da pridobimo krivuljo upadanja ravni zvočnega tlaka [2].

Preko meritev impulznega odziva se je poleg odmevnega časa izračunalo sledeča akustična parametra:

- **Definicija**, D_{50} (ang. *definition*) = parameter, ki pove, kako čist je zvočni val, preko merjenja razmerja začetnih in poznejših energij, ki prispejo do občinstva, v razkoraku 50 ms [2, 3].
- **Toplina** (ang. *Warmth*) = odmevnost v območju nizkih (basovskih) tonov, med 75 Hz in 350 Hz, označeno tudi kot BR (ang. *Bass ratio*) in se ga lahko izračuna po Beranek [4] kot $BR = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{1000})$, ali po Adelman-Larsen et. al [5] kot $BR = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{2000})$ [3, 4]

2.2 Odeon Auditorium

Akustično projektiranje je v preteklosti osnovalo na posnemanju primerov dobrih praks. V zadnjih desetletjih se je razvoj akustike pospešil tudi zaradi simulacijskih orodij, s katerimi se je proces projektiranja akustike in akustičnih sanacij bistveno pohitil. Med simulacijskimi orodji ločimo na tiste, ki temeljijo na geometrijskih

metodah širjenja zvoka, in tiste, ki uporabljajo valovne metode modeliranja.

Za potrebe te študije sem uporabil programsko orodje Odeon Auditorium [6], ki sodi med geometrijske metode simuliranja prostorske akustike. Prednost geometrijskih metod je njihova časovna učinkovitost [2], slabost je, da predpostavijo širjenje zvoka kot žarkov in zanemarijo nekatere aspekte valovne narave zvoka. Slednje se praviloma pokaže kot omejitve v območju nizkih frekvenc, kjer so tudi napake posledično večje [7]. Frekvenčna meja, nad katero je geometrijska metoda simuliranja primerna za obravnavo izbranega prostora, je Schröderjeva frekvenca:

$$f_s = 2000 \left(\frac{m}{s} \right)^{3/2} \times \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (1)$$

kjer je T izmerjeni odmevni čas in V volumen obravnavanega prostora [1, 2]. V primeru obravnavane glavne industrijske hale KČB je Schröderjeva frekvenca, $f_s = 70,7$ Hz. Pri predpostavki, da je izračunano frekvenca znotraj terčnega pasu s srednjo vrednostjo 63 Hz, sem predpostavil, da lahko s simulacijskim orodjem obravnavam oktavne pasove nad 125 Hz.

Programsko orodje ODEON uporablja algoritme, ki izračuna pozne odboje z metodo sledenja žarku (ang. *ray-tracing method*) in zgodnje zvočne odboje s hibridno kombinacijo metode zrcalnih izvirov (ang. *image source method*) in metodo sledenja žarku za odboje, ki se pojavijo pred določenim vrstnim redom odbojev. Zgodnji razpršeni odboji so simulirani z metodo zrcalnih izvirov vsakič, ko je prepoznan zrcalni izvir. V drugem delu simulacije, ko so pozni odboji računani z metodo sledenja žarku, se simulira tudi sekundarne zvočne izvire, ki sevajo energijo lokalno od površin, na podlagi frekvenčno odvisne usmerjenosti. Pri čemer se lahko izbira med Lambertevo, poševno Lambertevo ali enotno usmerjenostjo v odvisnosti od izbranih odbojnih lastnost. Ravno to je prednost programskega orodja ODEON, saj omogoča prilagodljivost parametrov simulacije, med drugim tudi v času trajanja zgodnjih in poznih odbojev [6, 8]. V svojih simulacijah sem uporabil impulzni odziv dolžine 3000 ms in določil število zgodnjih odbojev na 2500 ter število poznih odbojev na 5000. S tem sem izbral dolžino trajanja simulacije, ki je zagotovila ponovljivost rezultatov.

3 Meritve

Tekom študije se je obravnavala industrijska hala KČB, kjer so predvideni raznoteri dogodki, od koncertov sodobne glasbe, gledališča do predavanj, sejmov in razstav. Tako raznolika uporaba zahteva večjo fleksibilnost akustičnih elementov kot je to v navadi za prizorišča sodobne glasbe ali gledališča. Zaradi raznolikosti predvidenih rab prostora so se prvotne meritve obstoječega stanja prostorske akustike izvedle v nezasedenem stanju. S tem namenom se je najprej iz vseh prostorov umaknilo nepotrebno in nepritrjeno opremo, nato se je manjkajoči del stavbnega pohištva, razbita in manjkajoča okna ter vrata, prekrilo z gladkimi

lesenimi ploščami. Stanje v katerem se je izvedlo meritve je vidno na sliki 1.



Slika 1: Fotografija v času opravljanja meritev v spraznjeni industrijski hali KČB.

Opravilo se je meritve odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa na 14 različnih legah mikrofona in 2 različnih legah izvora zvoka ter meritve impulznega odziva na 9 različnih legah mikrofona pri 1 legi izvora. Lege se je pridobilo s pomočje 3D skeniranja, ki se je izvajalo sočasno z akustičnimi meritvami.

3.1 3D-SKENIRANJE

3D lasersko skeniranje se je izvedlo s strojne opreme: Trimble X7 in programske opreme: Trimble RealWorks. Na sliki 2 je prikaz uporabe 3D skenerja v času meritev.

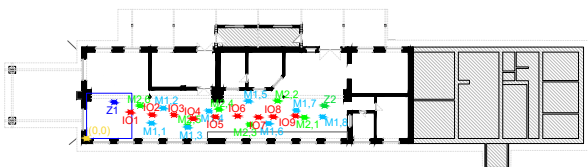


Slika 2: Prikaz uporabe 3D skenerja v času meritev.

3D skeniranje je omogočilo hitro in precizno

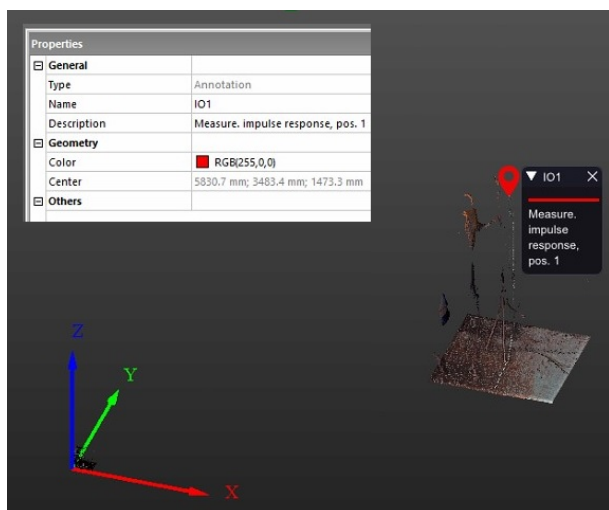
pridobivanje leg mikrofonov in izvora. Na osnovi primerjave obeh metod ocenjujem, da je odstopanje pri določanju lege mikrofona manj kot 1 cm. Pridobljene vrednosti so predstavljene v tabeli 1. Prvih nekaj meritev se je preverilo tudi z ročnim merjenjem leg mikrofonov in izvorov z uporabo laserskim in tračnim dolžinskim merilom, vendar se je za nadaljnje meritve to opustilo zaradi zamudnosti. Posamezna meritev s 3D skenerjem je trajala do 2 minuti, vključno s premikom skenerja. Na drugi strani je pri krajših razdaljah od bližnjih sten merjenje vzelo vsaj 2-kratnik časa.

Rezultati so predstavljeni tudi grafično na sliki 3. Z rumeno barvo je označeno v spodnjem levem kotu koordinatno izhodišče in z modrim kvadratom predvideno območje odra. Z modrimi oznakami $M1,i$ so označene lege mikrofonov za meritve odmevnega časa s prekinjenim hrupom in lego izvora $Z1$, z zelenimi oznakami $M2,i$ lege mikrofonov za meritve odmevnega časa s prekinjenim hrupom in lego izvora $Z2$ ter z rdečimi oznakami IOi lege mikrofonov za meritve impulznega odziva.



Slika 3: Leg mikrofonov in izvorov zvoka v času meritev

Posamezne koordinate mikrofona se je določilo v programskem orodju RealWorks z uporabo funkcije 'limit-box selection' in določanje najvišje ležeče točke. Postopek je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Prikaz določitve koordinat zgornje točke mikrofona v programskem orodju RealWorks.

Poleg merjenja leg mikrofonov in izvorov zvoka se je 3D skener uporabilo za pridobitev oblaka točk celotnega prostora. V naslednjem koraku se je ustvarilo

3D model za potrebe simulacijskega orodja ODEON Auditorium, ampak smo pri pretvorbi oblaka točk v poenostavljen 3D model naleteli na oblico ovir. Najprej smo ugotovili, da je 3D skeniranje izjemno natančno. V oblaku točk smo poleg osnovne geometrije zajeli tudi vso manjšo neodstranjeno pohištvo. Slednje je oviralo potek laserskih žarkov, zato je bil v določenih kotih oblak točk preveč kompleksen v primerjavi s potrebnim 3D modelom, ki ga za svoje delovanje potrebuje ODEON Auditorium. Težavno je bilo poenostaviti množico točk v osnovne geometrijske oblike (trikotnike, plošče, krožnice, oboke, itd.). Tu smo naleteli na dodatno težavo, saj je na spletu bilo pomanjkljivo število vodičev in navodil. Vseeno se je orodje dalo izkoristiti za pridobitev koordinat ključnih točk geometrije prostora, kot so vogalne točke, spodnje in zgornje točke oboka itd.

Tabela 1: Leg mikrofonov in izvorov zvoka v času meritev.

Leg	X (m)	Y (m)	Z(m)
Izhodišče	0,00	0,00	0,00
Z1	3,66	4,81	1,61
Z2	31,57	4,34	1,59
M1,1	8,62	2,02	1,65
M1,2	10,17	4,02	1,03
M1,3	13,42	1,48	1,02
M1,4	16,23	3,63	1,72
M1,5	21,48	4,95	1,72
M1,6	24,15	1,98	1,22
M1,7	27,82	3,72	1,72
M1,8	31,32	2,86	1,73
M2,1	28,89	2,78	1,72
M2,2	25,33	4,99	1,36
M2,3	21,64	1,84	1,15
M2,4	17,55	3,85	1,16
M2,5	13,41	1,67	1,75
M2,6	7,10	4,34	1,78
IO1	5,83	3,48	1,50
IO2	8,7	3,14	1,51
IO3	11,59	3,12	1,43
IO4	14,02	3,03	1,51
IO5	17,12	2,86	1,51
IO6	20,04	2,97	1,51
IO7	22,78	2,82	1,50
IO8	24,78	2,87	1,51
IO9	27,71	2,99	1,50

Ko se je ustvarilo 3D model, je bilo temu potrebno določiti lastnosti notranjih površin. Določevanje akustičnih lastnosti je potekalo iterativno, dokler rezultati simulacij niso sovpadala z rezultati opravljenih meritev. Umerjanje 3D modela je potekalo v več korakih:

- najprej se je določilo notranje in zunanje površine,
- nato se je določilo tip površine; "fractional" za obokane površine in "normal" za preostale,
- sledilo je določevanje koeficienta sipanja; za obokan strop 0,20 in za vse ostale 0,01,

- v končnem koraku smo predvideli tip materiala.

Znotraj zadnjega koraka se je za vse steklene površine izbralo že vnaprej definiran material: 1-slojno steklo z absorpcijskimi lastnostmi navedenimi v tabeli 2. Za vse preostale materiale se je absorpcijske lastnosti znotraj posameznega oktavnega pasu določevalo tako, da je simulacijski izračun odmevnega časa T_{30} , D_{50} in BR sovpadal, s tistimi izmerjenimi v dvorani. Končne definirane akustične lastnosti obstoječih materialov so zbrane v tabeli 2.

Tabela 2: Akustične lastnosti obstoječih materialov znotraj KČB, pridobljeno z umeritvenim simulacijskim modelom.

Material	Enoslojno steklo		Strop	Simulacijsko umerjen material	
	Vsa okna	Preostale površine		Stropni oboki	
Umestitev	63	0,1800	0,0940	0,0940	
	125	0,1800	0,0944	0,0944	
	250	0,0600	0,0985	0,0985	
	500	0,0400	0,1035	0,1035	
	1000	0,0300	0,1160	0,1160	
	2000	0,0200	0,1225	0,1225	
	4000	0,0200	0,1685	0,1685	
	8000	0,0200	0,2150	0,2150	
Tip površine		Normal	Fractional	Normal	
		0,0100	0,2000	0,0100	
Absorpcijski koeficient					
koefficient sipanja					

4 Diskusija

Umerjanje 3D simulacijskega modela je temeljilo na sovpadanju merilnih leg mikrofonov in "merilnih" leg v simulacijskem orodju. Tako se je za umeritev vneslo vseh 9 merilnih leg impulznega odziva in pozicijo izvora Z1. Po vsaki iteraciji se je preverilo izračunan povprečni odmevni čas za vse lege in se ga primerjalo z

Tabela 3: Primerjava rezultatov meritev in simulacij v istih legah prostora.

Iteracija \ Frekvenca (Hz)	T(30)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
IO1 - Odeon	1,71	1,78	1,7	1,51	1,37	0,88	0,53
IO1 - Meritev	1,74	1,79	1,74	1,53	1,41	0,97	0,6
Razlika	0,03	0,01	0,04	0,02	0,04	0,09	0,07
IO2 - Odeon	1,73	1,79	1,71	1,52	1,38	0,89	0,53
IO2 - Meritev	1,77	1,76	1,67	1,55	1,4	1,04	0,61
Razlika	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,15	0,08
IO3 - Odeon	1,77	1,83	1,74	1,54	1,4	0,9	0,54
IO3 - Meritev	1,52	1,87	1,69	1,51	1,41	1,02	0,62
Razlika	0,25	0,04	0,05	0,03	0,01	0,12	0,08
IO4 - Odeon	1,77	1,84	1,75	1,54	1,39	0,91	0,55
IO4 - Meritev	1,53	1,81	1,76	1,55	1,44	1,03	0,61
Razlika	0,24	0,03	0,01	0,01	0,05	0,12	0,06
IO5 - Odeon	1,8	1,86	1,77	1,56	1,42	0,94	0,57
IO5 - Meritev	1,9	1,82	1,8	1,53	1,38		
Razlika	0,1	0,04	0,03	0,03	0,04		
IO6 - Odeon	1,81	1,87	1,78	1,57	1,43	0,98	0,61
IO6 - Meritev	1,92	1,95	1,77	1,58	1,49	1,11	0,68
Razlika	0,11	0,08	0,01	0,01	0,06	0,13	0,07
IO7 - Odeon	1,8	1,85	1,77	1,58	1,44	1	0,64
IO7 - Meritev	1,9	1,9	1,76	1,6	1,45	1,13	0,69
Razlika	0,1	0,05	0,01	0,02	0,01	0,13	0,05
IO8 - Odeon	1,8	1,85	1,77	1,58	1,45	1,01	0,64
IO8 - Meritev	1,97	1,79	1,79	1,59	1,5	1,1	0,7
Razlika	0,17	0,06	0,02	0,01	0,05	0,09	0,06
IO9 - Odeon	1,79	1,83	1,75	1,56	1,44	1	0,64
IO9 - Meritev	1,86	1,83	1,76	1,62	1,52	1,1	0,71
Razlika	0,07	0,00	0,01	0,06	0,08	0,1	0,07
$T_{30,povp}$ - Odeon	1,77	1,83	1,75	1,55	1,41	0,94	0,58
$T_{30,povp}$ - Meritev	1,79	1,84	1,75	1,56	1,44	0,94	0,58
Razlika	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00
Povprečen odklon	0,12	0,04	0,02	0,02	0,04	0,12	0,07
Procentualni povprečen odklon	7,7%	2,3%	1,6%	1,7%	3,1%	12,3%	11,6%

izračunanim povprečnim odmevnim časom izmerjenim z impulznim odzivom. Pri tem se je gledalo vsak oktavni pas posamično, saj se je absorpcijski koeficient vnašalo v odvisnosti od frekvenca. Ob ustreznem povprečnem odmevnem času se je preverilo še ujemanje med isto-ležečimi simulacijskimi in merilnimi legami. Rezultati so zbrani v tabeli 3.

Kot je vidno v tabeli se absolutne vrednosti povprečnega odklona med izmerjeno in simulacijsko vrednostjo odmevnega časa znotraj posameznega oktavnega pasu gibljejo med 0,02 s in 0,12 s, oziroma procentualno glede na povprečno vrednost odmevnega časa znotraj posameznega oktavnega pasu med 1,6% in 12,3%. V ključnih oktavnih pasovih, med 125 Hz in 2000 Hz, ujemanje simulacijskih in izmerjenih vrednosti ocenjujem kot ustrezno. Pri primerjavi povprečnih vrednosti dobljeni preko meritev in simulacije vidimo, da so absolutne razlike odmevnega časa znotraj oktavnih pasov do 0,03 s.

5 Zaključek

Uporaba 3D skeniranje kot pomožno orodje za izvajanje akustičnih meritev se je pokazalo ne le kot ustrezno, temveč tudi kot opcija velikega potenciala. Skeniranje je pohitrilo postopek izmere dimenzij prostora in leg mikrofonov ter izvora. Prav tako je pohitrilo postopek umerjanje simulacijskega modela in mu dodalo k preciznosti. Orodje ima pomanjkljivosti, ko pride do pretvorbe oblaka točk v 3D model, saj za začetnika programska oprema zahteva dodatno pozornost. Ob lažji pretvorbi oblaka točk v geometrijski format, ki ga sprejemajo računalniške simulacije, bi 3D skeniranje lahko odprlo nove možnosti raziskovanja zvoka.

Literatura

- [1] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. CRC Press, 10 2016.
- [2] R. Prislán, "Modeliranje akustike prostora z naprednimi žarkovnimi metodami," 2018.
- [3] N. W. Adelman-Larsen, *Rock and Pop Venues*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [4] L. Beranek, "Concert hall acoustics," *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 56, pp. 532–544, 2008.
- [5] N. W. Adelman-Larsen, E. R. Thompson, and A. C. Gade, "Suitable reverberation times for halls for rock and pop music," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, pp. 247–255, 1 2010.
- [6] O. A/S, "Odeon room acoustics software user's manual version 17," 12 2021.
- [7] L. Savioja and U. P. Svensson, "Overview of geometrical room acoustic modeling techniques," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, pp. 708–730, 8 2015.
- [8] L. Shtrepi, A. Astolfi, S. Pelzer, R. Vitale, and M. Rychtáriková, "Objective and perceptual assessment of the scattered sound field in a simulated concert hall," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, pp. 1485–1497, 9 2015. Govori z Rokom, če bi dodal še kaj glede razpršenosti zvočnega signala v prostoru.