

Lokalizacija mikrofonskega polja z uporabo laserskega skenerja

dr. Rok Prislan

InnoRenew CoE, Livade 6a, SI-6310 Izola, Slovenija
E-pošta: rok.prislan@innorenew.eu

Positioning of a microphone array with a laser scanner

A laser scanner is used in many fields, while it is not yet widely used in acoustics. The most obvious possibility is to use the device in field measurements to capture the geometry of the room in the form of a point cloud. In this study, the laser scanner is used to determine the coordinates of the microphones, which is done for the challenging case of an array of 60 microphones. The use of the laser scanner is presented and the required geometric considerations are explained. Based on an experiment, several hundred microphone coordinates are acquired and presented as part of the results. The performed investigation provides evidence of the efficiency of the studied approach for determining the position of microphones in space.

1 Uvod

Del merilnega postopka v akustiki je zajem lege mikrofонов v času meritev. Predvsem pri eksperimentih je namreč dana zahteva po ponovljivosti, zaradi česar je podatek o mikrofonski legi pomemben del merilne dokumentacije. Poleg tega so pri nekaterih standardiziranih merilnih postopkih dane tudi druge zahteve za lego mikrofona, kot je na primer minimalna oddaljenost od zvočnega izvora ob meritvah odmevnega časa [1, 2].

V primeru majhnega števila meritev z enim samim mikrofonom je najenostavneje določiti njegovo lego z uporabo dolžinskega metra ali laserskega merilca razdalje, z uporabo katerih določimo kartezične koordinate mikrofona v prostoru glede na izbrano koordinatno izhodišče. Takšen pristop postane presenetljivo težaven, ko je geometrija prostora kompleksna in nimamo pravokotnih površin (sten, tal in stropa), ki bi nam bile ob meritvah v pomoč. V takšnih primerih hitro pride do precejšnjih napak pri določanju lege. Takšen merilni postopek postane tudi izredno zamuden ali celo neizvedljiv z želeno natančnostjo, ko izvajamo meritve z velikim številom mikrofонов [3], ali je leg mikrofona veliko, saj se njegova pozicija spreminja na motoriziran način [4, 5].

Osrednja motivacija za raziskovanje alternativnih oz. naprednejših metod lokalizacije mikrofонов izhaja iz želene nadgradnje pretekle raziskave karakterizacije zvočnega polja [6], in sicer z razširitvijo meritev na visoko število mikrofonskih leg. V sklopu preteklih raziskav sem tako

že opazoval možnosti uporabe akustične lokalizacije [7] za določitev lege mikrofona. Ta temelji na določitvi koordinat ob poznavanju oddaljenosti od znanih leg zvočnih virov, pri čemer meritev temelji na meritvah impulznih odzivov [8]. V luči tega je uporaba laserskega skenerja alternativna možnost, ki predvsem zahteva dostop do laserskega skenerja, ki v splošnem ni del konvencionalne opreme akustičnega laboratorija, a je v primeru akustičnega laboratorija InnoRenew CoE na razpolago. Tako se v prispevku osredotočam na določanje koordinat več mikrofонов sočasno, in sicer 60 mikrofонов urejenih v polje. Ob pregledu področnih raziskav ugotavljam, da je laserski skener na področju akustike v preteklosti bil uporabljen za zajem geometrije prostora (npr. [9]), ne pa za določanje mikrofonskih leg.

V članku predstavim temeljni princip laserskega skeniranja ter računski postopek določanja koordinat na osnovi zajetih koordinat barvnih oznak. Predstavljen je potek izvedene meritve in dobljene koordinate mikrofонов.



Slika 1: Fotografija laserskega skenerja Trimble X7 v uporabi.

2 Metoda laserskega skeniranja

Princip delovanja laserskega skenerja temelji na LIDAR tehnologiji, katere kratica izhaja iz angleškega akronima *Light Detection And Ranging* [10]. Tehnologija se uporablja na več področjih prepoznavanja topologije [11], in v večini primerov temelji na izračunu razdalje med detektorjem in odbojno površino na osnovi časa preleta laserskega žarka. Komercialne izvedebe LIDAR skenerja z obračanjem smeri visoko usmerjenega laserskega žarka, lahko sestavijo oblak točk t.j., koordinat točk obodnih površin prostora.

V sklopu raziskave sem uporabil laserski skener Trimble X7 [12], fotografija katerega v času delovanja je prikazana na sliki 1. Skener deluje na osnovi laserske svetlobe nevidnega spektra, in sicer valovne dolžine 1550 nm. Po zagotovilih proizvajalca je natančnost določanja razdalje do posamezne točke 2 mm, medtem ko je natančnost določanja njenih prostorskih koordinat odvisna od razdalje do detektorja in pri oddaljenosti 10 m znaša 2.4 mm.

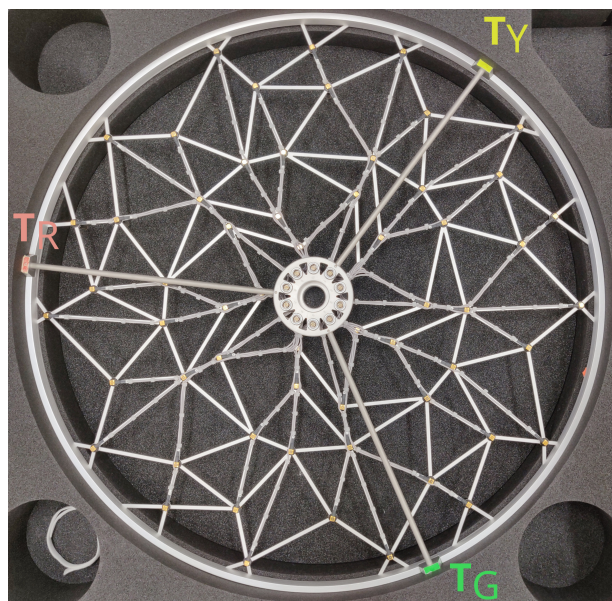
Laserski skener v relativno kratkem času (tipično nekaj minut) zajame več deset milijonov točk, pri čemer napredni algoritmi omogočajo kombiniranjem podatkov zajetih iz več leg skenerja. Poleg tega naprava zajame tudi vidno sliko (fotografijo), s katero nadgradi oblak točk. Tako se poljubni točki iz oblaka pripiše barva, kar je omogočilo, da sem barvno označena območja na hrbtni strani mikrofonkega polja prepoznal ter na osnovi teh v sklopu analize rezultatov določil koordinate posameznega mikrofona.

Pomemben aspekt uporabe laserskega skenerja je resolucija zajema oblaka točk, ki jo razumemo kot karakterističen razmik med sosednjimi točkami v oblaku, recimo zajetih na isti mejni površini prostora. Pri tem je pomemben parameter čas skeniranja, saj število zajetih točk in torej njihova gostota narašča s časom skeniranja, ki je torej pomemben parameter zajema. Drugi parameter, ki določa resolucijo skeniranja, je oddaljenost skenerja od opazovanih točk, saj njihova površinska gostota pada kot inverz oddaljenosti. Posledično je smiselno, da je laserski skener umeščen bližje merjencu.

3 Lasersko skeniranje mikrofonkega polja

Tri pravokotne dele hrbtne strani obroča mikrofonkega polja sem obarval z rdečo (R), zeleno (G) in rumeno (Y), kot je prikazano na sliki 2. Pri tem sem moral biti pozoren, da je velikost barvne oznake bila zadosti velika in tako bila ob izbrani gostoti zajetih točk vselej prepoznana. Istočasno sem moral biti pozoren, da barvna oznaka ni bila prevelika, kar bi pomenilo večjo negotovost pri določanju koordinat barvnih oznak. Izbrana velikost posamezne barvne oznake je bila 20 x 5 mm.

Dodatno velja izpostaviti, da je ravnina mikrofonskih kapsul, ki jih štejemo kot koordinato posameznega mikrofona, pomaknjena $d = 70$ mm izven ravnine, ki jo določajo barvne oznake.



Slika 2: Fotografija hrbtne strani mikrofonkega polja z vidnimi barvnimi oznakami rdeče (R), zelene (G) in rumene (Y) barve. Na drugi strani polja so kapsule mikrofonov, ki so $d = 70$ mm zamaknjene glede na ravnino barvnih oznak. Velikost barvnih oznak je 20 x 5 mm.

mikrofon	x [mm]	y [mm]	r [mm]	φ [°]
1	-68.8	23.8	72.8	-70.9
2	-120.3	23.8	122.7	-78.8
3	-82.8	128.8	153.1	-32.8
4	-187.5	81.2	204.4	-66.6
5	-109.4	176.3	207.5	-31.8
6	-207.9	29.7	210	-81.9
7	-226.6	184.2	292.1	-50.9
8	-117.2	273.4	297.5	-23.2
9	-286	103	304	-70.2
10	-284.4	198.1	346.6	-55.1

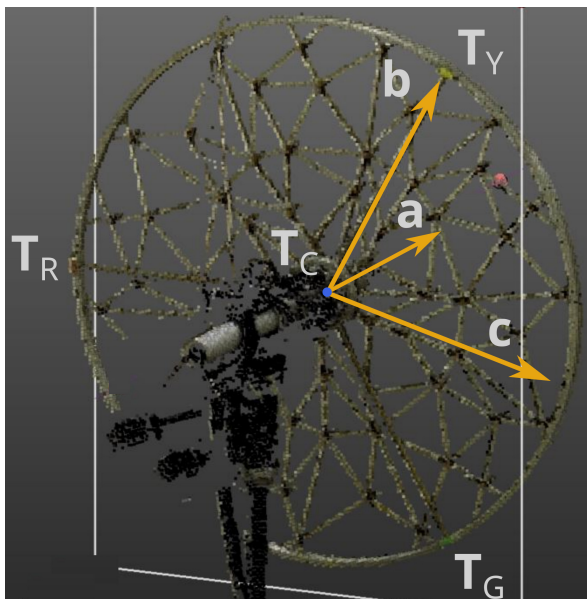
Tabela 1: Kartezične ravninske koordinate prvih 10-ih mikrofonov v polju in pripadajoče polarne koordinate.

3.1 Koordinatni sistem mikrofonkega polja

Mikrofonsko polje ima psevdonaključno razporejenih 60 mikrofonov v področje diska premera 72 cm. Ravninske kartezične koordinate posameznega mikrofona (lokalne koordinate), so za 10 mikrofonov navedene v tabeli 1, in sicer kot podatek s strani proizvajalca mikrofonkega polja. Tem za potrebe analize pripišem pripadajoče polarne koordinate, kot jih naravno določa diskasta oblika polja. Polarni koordinati vsakega mikrofona sta torej radij r_i in kot φ_i , ki se izračunata kot

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad \varphi_i = \arctan \frac{y_i}{x_i}. \quad (1)$$

Pri tem velja, da je s smerjo, ki jo določa točka T_Y , poravnana y os, od katere se meri kot φ . Dodatno moram biti pozoren, da ločeno obravnavam pozitivne in negativne segmente posamezne osi ter tako s pribitkom 180° dosežem celoten kot $-180^\circ < \varphi < 180^\circ$.



Slika 3: Grafični prikaz centralne pozicije mikrofonskega polja T_C in pravokotnih vektorjev a , b in c , pri čemer je a normala ravnine, ki jo določa mikrofonsko polje.

Lego polja v prostoru lahko določimo na osnovi koordinate centralne lege mikrofonskega polja, T_C , in normale, a , ki podaja orientacijo polja. Za določitev koordinate posameznega mikrofona moramo dodatno poznati tudi vektor, ki ga označimo z b in kaže v smeri barvne oznake T_C , od katerega je odmerjen φ posameznega mikrofona. Uvedene točke in vektorji so shematsko prikazani na fotografiji na sliki 3.

V naslednjem koraku uvedem še vektor c , ki je pravokoten na vektorja a in b , zato ga lahko izračunam na osnovi vektorskega produkta

$$c = a \times b. \quad (2)$$

3.2 Pretvorba mikrofonskih koordinat

Koordinate mikrofona v prostoru določim na osnovi pridobljenih treh koordinat barvnih oznak T_R , T_G , T_Y . Slednje so namreč vhodni podatek, ki izhaja iz zajetega oblaka točk.

Ker so vse tri točke na obodu mikrofonskega polja, ki ga delijo na tri enake izseke, lahko koordinate centralne lege polja določim kot njihovo aritmetično sredino

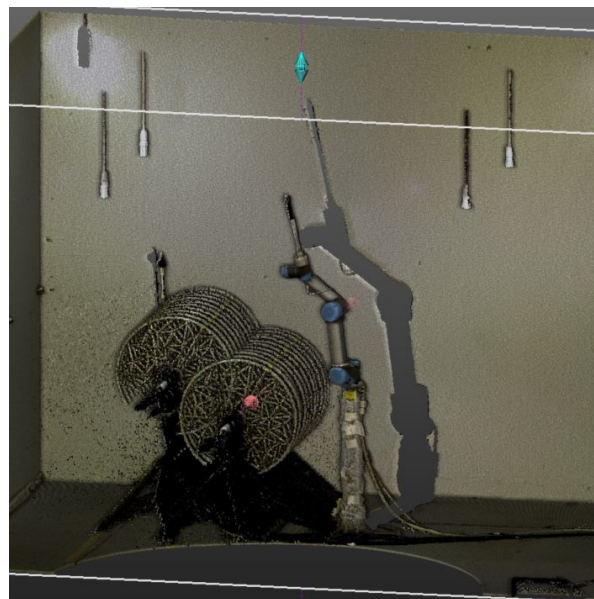
$$T_C = \frac{1}{3} (T_R + T_G + T_Y). \quad (3)$$

Sledi določitev vektorjev a , b in c . Pri tem je vektor b v ravnini polja in kaže iz centralne lege proti rumeni oznaki

$$b = \|T_Y - T_C\|. \quad (4)$$

Vektor a je normala ravnine mikrofonskega polja in jo določim na osnovi vektorskega produkta dveh nevzporednih vektorjev v ravnini

$$a = \|b \times (T_R - T_C)\| \quad (5)$$



Slika 4: Prekrivna slika obarvanega oblaka točk 21ih merilnih leg mikrofonskega polja.

Nazadnje izračunam še vektor c po enačbi (2). Na osnovi uvedenega lahko izračunam še iskano koordinato i -tega mikrofona

$$M_i = T_C + d \cdot a + r_i \cos \varphi_i \cdot b + r_i \sin \varphi_i \cdot c, \quad (6)$$

pri čemer je drugi člen dodan zaradi zamika mikrofonskih kapsul izven ravnine barvnih oznak.

4 Potek meritve

Meritev sem izvedel v škatlastem prostoru, pri čemer je bilo mikrofonsko polje umeščeno na stojalo, lego katerega sem premočrtno spreminjali v cca. 10 cm korakih. Premikanje sem izvedel v dveh segmentih in postavil polje v skupno 21 leg. Za vsako sem izvedel skeniranje z laserskim skenerjem, ki je trajalo cca. 2 min. Oblaki točk za 21 skenov mikrofonskega polja so prikazani na sliki 4.

V naslednjem koraku sem barvne oznake ročno izpisal iz programa za obdelavo oblaka točk, in sicer za vsakega izmed 21 skenov. Pri tem velja poudariti, da je koordinatno izhodišče, za katerega laserski skener podaja koordinate, postavljeno v lego skenerja. Za pretvorbo koordinat v drug koordinatni sistem bi morali torej izvesti ustrezno transformacijo koordinat.

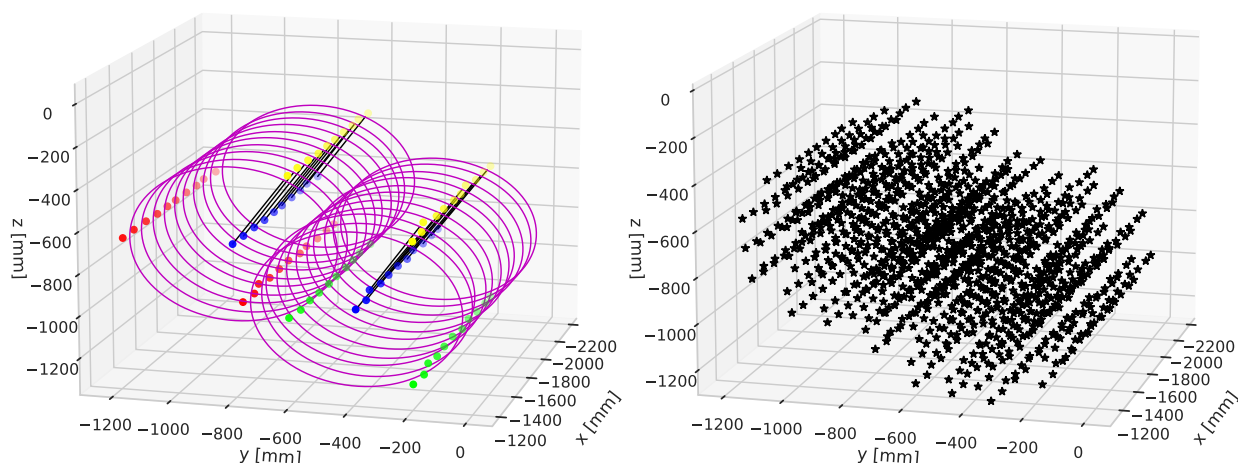
5 Rezultati

Zabeležene koordinate barvnih oznak so navedene v tabeli 2. Tem so pripisane koordinate T_C izračunane po (3), vektorji normale a izračunani na osnovi enačbe (5) ter vektorji b in c izračunani po enačbah (4) in (2).

Prepoznane barvne oznake so izrisane na sliki 5, katerim je dorisan tudi krožni profil mikrofonskega polja in vektor b . Za vsako izmed 21 merilnih leg je nato izračunanih 60 koordinat mikrofona skladno z enačbo (6), ki so v prostorskem pogledu ravno tako izrisane na sliki 5.

poz.	T_R [x,y,z][mm]	T_G [x,y,z][mm]	T_Y [x,y,z][mm]	T_C [x,y,z][mm]	a [x,y,z][mm]	b [x,y,z][mm]	c [x,y,z][mm]
0	[-2186,-787,-928]	[-2183,-205,-1249]	[-2197,-213,-586]	[-2184,-399,-1142]	[1000,7,21]	[-22,491,871]	[5,871,-491]
1	[-2092,-784,-924]	[-2095,-200,-1246]	[-2104,-213,-584]	[-2094,-395,-1139]	[1000,13,14]	[-18,486,874]	[-4,874,-487]
2	[-1996,-786,-928]	[-1987,-200,-1245]	[-1997,-212,-584]	[-1990,-395,-1139]	[1000,-7,15]	[-10,488,873]	[14,873,-488]
3	[-1887,-790,-925]	[-1885,-203,-1237]	[-1894,-220,-574]	[-1886,-399,-1133]	[1000,4,14]	[-14,479,878]	[3,878,-479]
4	[-1795,-783,-924]	[-1788,-199,-1246]	[-1799,-211,-582]	[-1790,-394,-1139]	[1000,-3,17]	[-13,486,874]	[11,874,-486]
5	[-1697,-791,-921]	[-1704,-209,-1247]	[-1713,-211,-581]	[-1702,-403,-1138]	[1000,20,14]	[-22,498,867]	[-10,867,-498]
6	[-1595,-789,-922]	[-1589,-206,-1245]	[-1599,-214,-580]	[-1591,-400,-1137]	[1000,-2,15]	[-12,491,871]	[9,871,-491]
7	[-1486,-785,-920]	[-1492,-203,-1249]	[-1501,-211,-577]	[-1490,-397,-1139]	[1000,18,14]	[-21,487,873]	[-9,873,-487]
8	[-1398,-793,-914]	[-1388,-204,-1236]	[-1393,-225,-567]	[-1391,-400,-1129]	[1000,-13,7]	[0,474,880]	[15,880,-474]
9	[-1307,-776,-921]	[-1295,-191,-1247]	[-1305,-205,-577]	[-1299,-386,-1138]	[1000,-12,15]	[-7,481,876]	[18,876,-481]
10	[-1202,-778,-918]	[-1185,-195,-1243]	[-1193,-203,-578]	[-1191,-389,-1135]	[1000,-23,12]	[1,491,871]	[25,871,-491]
11	[-2143,-1216,-675]	[-2123,-631,-993]	[-2141,-646,-331]	[-2130,-826,-887]	[999,-20,27]	[-14,483,876]	[30,875,-482]
12	[-2036,-1222,-675]	[-2017,-638,-996]	[-2037,-649,-327]	[-2023,-833,-889]	[999,-16,30]	[-18,484,875]	[29,875,-483]
13	[-1945,-1215,-675]	[-1925,-632,-995]	[-1946,-642,-328]	[-1932,-826,-888]	[999,-17,31]	[-19,485,874]	[30,874,-485]
14	[-1843,-1214,-672]	[-1829,-627,-994]	[-1844,-641,-326]	[-1834,-823,-887]	[1000,-12,22]	[-14,483,876]	[21,876,-482]
15	[-1740,-1214,-673]	[-1719,-627,-994]	[-1738,-638,-327]	[-1726,-823,-887]	[999,-20,28]	[-15,487,873]	[31,873,-486]
16	[-1646,-1208,-668]	[-1623,-622,-991]	[-1640,-634,-324]	[-1631,-817,-883]	[999,-25,25]	[-10,486,874]	[34,874,-485]
17	[-1545,-1205,-667]	[-1518,-622,-991]	[-1541,-632,-326]	[-1527,-816,-883]	[999,-27,34]	[-16,488,873]	[40,872,-487]
18	[-1449,-1208,-667]	[-1426,-624,-990]	[-1442,-635,-324]	[-1434,-819,-882]	[999,-26,24]	[-8,487,874]	[34,873,-486]
19	[-1340,-1208,-666]	[-1319,-620,-990]	[-1332,-635,-321]	[-1326,-816,-882]	[1000,-25,19]	[-4,482,876]	[31,876,-482]
20	[-1240,-1207,-667]	[-1218,-626,-986]	[-1231,-634,-322]	[-1225,-820,-880]	[999,-27,19]	[-3,489,873]	[33,872,-488]

Tabela 2: [x,y,z] koordinate barvnih označb pridobljenih na osnovi laserksa skeniranja, koordinate pripadajočih centralnih leg polja ter komponente vektorjev a , b in c .



Slika 5: Levo: prostorski izris barvnih označb (R, G, Y) in krožnih profilov mikrofonskega polja za 21 merilnih leg. Desno: pripadajoče lege 60 mikrofonov polja kot skupno 1260 točk v prostoru.

Ob vizualni primerjavi (slika 4 in slika 5 levo) ocenjujem, da so določene mikrofonske koordinate smiselne, saj lega polja sovпада izvedenim korakom premikanja stola med merilnimi legami. Prestavljena metoda je torej primerna za določanje lege visokega števila mikrofonov, saj z relativno nezamudnimi koraki omogoča prepoznavo koordinat kar 1260 mikrofonov. V takšnem primeru bi namreč uporaba dolžinskega metra bila nesprejemljivo zamudna. Za podrobnejšo analizo napake pri določanju koordinat mikrofonov bi bilo v nadaljevanju smiselno te določiti tudi z drugo metodo, s katero bi lahko izvedli nato primerjavo. Pri tem poleg uporabe dolžinskega metra, smiselna tudi primerjava s konkurenčno metodo akustične lokalizacije [7]. Dodatno bi za oceno napake pri določanju koordinat mikrofonov, ki jo lahko z metodo pričakujemo, da bi jo uporabili za primeru dobro poznanih leg, recimo ob krožnem gibanju mikrofonov.

6 Zaključki

V sklopu prispevka sem predstavil možnost uporabe laserskega skenerja za določanje koordinat mikrofonov v prostoru. Ti so bili urejeni v večjo mikrofonsko polje, zaradi česar je bilo mogoče ob 21 meritvah določiti lege kar 1260 mikrofonov. V sklopu prispevka so bila predstavljena vsa potrebna teoretična izhodišča in geometrijski koraki, potrebni za izračun koordinat mikrofonov.

Izvedene meritve kažejo na smiselnost rezultatov, s čimer potrjujemo potencial uporabe opisanega pristopa. Pri tem izpostavljam, da podrobnejša analiza, ki bi vključevala primerjavo z drugimi metodami in predvsem analizo napak pri določanju koordinat, ni bila izvedena. Takšno analizo prepoznavam kot potencialno bodočo razširitev raziskave, na osnovi katere bi bilo mogoče tudi kvantitativno ovrednotiti uspešnost pristopa.

Ne glede na navedeno ocenjujem, da je potencial laserskega skenerja velik. Razlog za to je predvsem dej-

stvo, da lahko s pristopom v časovnem oknu nekaj minut in relativno enostavno obdelavo podatkov pridobimo informacijo o velikem številu mikrofonskih koordinat. Pri tem dodatno izpostavljam, da je ob skeniranju sočasno zajeta tudi preostala geometrija prostora, kar je dodatno uporabna informacija, npr. ob projektiranju akustičnih sanacij prostorov.

Zahvala

To delo je bilo podprto s sredstvi Okvirnega programa Evropske Unije, Obzorje 2020 (H2020 WIDESPREAD-2-Teaming: #739574, InnoRenew CoE) in Republike Slovenije, Investicijsko financiranje Republike Slovenije in Evropske unije iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] ISO 354:2003: *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, Geneva, Switzerland
- [2] ISO 3382-1:2003: *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, Geneva, Switzerland
- [3] R. Prislan, D. Svenšek: *Room mode shape visualization using a multi-microphone measurement technique*, Proceedings of the 7th AAAA Congress, 2016
- [4] M Nolan, M. Berzborn and E. Fernandez-Grande: *Isotropy in decaying reverberant sound fields*, The Journal of the Acoustical Society of America, 148(2), 1077 - 1088, 2020
- [5] M. Nolan, S. A. Verburg, J. Brunskog, E. Fernandez-Grande: *Experimental characterization of the sound field in a reverberation room*, The Journal of the Acoustical Society of America, 145(4), 2237 - 2246, 2019
- [6] R Prislan, J. Brunskog, F. Jacobsen, C.-H. Jeong: *An objective measure for the sensitivity of room impulse response and its link to a diffuse sound field*, The Journal of the Acoustical Society of America, 136(4), 1654 - 1665, 2014
- [7] R. Prislan: *Microphone positioning using acoustic location*, Proceedings of Forum Acusticum, 2020
- [8] P. Guidorzi, F. Pompoli, P. Bonfiglio, M. Garai: *A newly developed low-cost 3D acoustic positioning system: Description and application in a reverberation room*, Applied Acoustics, 160(4), 107127, 2020
- [9] M. Böck, D. Doebler, G. Heilmann, A. Meyer, H. Waibel: *Fields of application for three-dimensional microphone arrays for room acoustic purposes*, Proceedings of ACOUSTICS 2011, 2011
- [10] "LIDAR — Wikipedia, The Free Encyclopedia": <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>, obiskano 17.8.2022
- [11] J. Shan, C. K. Toth: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, 2nd Edition*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (2018)
- [12] "TRIMBLE X7": <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-x7>, obiskano 17.8.2022