



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI  
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI,  
CERCETĂRII,  
TINERETULUI  
ȘI SPORTULUI

OIPOSDRU



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA”  
din BUCUREȘTI

Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Proiect POSDRU/159/1.5/S/132395 – InnoRESEARCH - Burse doctorale și postdoctorale în sprijinul inovării și competitivității în cercetare



# UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI

## FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE

# REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*Contribuții la percepția spațială a sunetelor 3D și la navigarea persoanelor cu deficiențe de vedere, prin antrenarea bazată pe feedback multimodal*

*Contributions to 3D sound-based space perception and navigation of visually impaired, through multimodal feedback training*

**Autor:** Florina-Oana Bălan

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Adina FLOREA	de la	Universitatea POLITEHNICA din București
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Florica MOLDOVEANU	de la	Universitatea POLITEHNICA din București
Referent	Prof. dr. ing. Florin RĂDULESCU	de la	Universitatea POLITEHNICA din București
Referent	Prof. dr. ing. Pawel STRUMILLO	de la	Lodz University of Technology, Polonia
Referent	Prof. dr. ing. György WERSÉNYI	de la	Széchenyi István University, Győr, Ungaria

București, 2015

## **CONTRIBUȚII LA PERCEȚIA SPAȚIALĂ CU AJUTORUL SUNETELOR 3D**

## CUPRINS

CAPITOLUL 1 .....	5
INTRODUCERE .....	5
1.1. MOTIVAȚIE .....	5
1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII .....	5
1.3. CONTRIBUȚIILE ȘTIINȚIFICE ALE AUTORULUI ÎN LEGĂTURĂ CU ACEASTĂ TEZĂ .....	6
1.4. STRUCTURA TEZEI .....	10
CAPITOLUL 2 .....	11
SUNET ȘI AUZ .....	11
2.1. LOCALIZAREA SPAȚIAL-AUDITIVĂ .....	11
2.1.1. Principii de bază ale localizării spațial-auditivă .....	11
2.1.2. Indicatori binaurali .....	11
2.1.3. Indicatori monaurali .....	12
2.1.4. Erori de localizare de inversare .....	12
2.2. ACURATEȚEA DE LOCALIZARE SPAȚIAL-AUDITIVĂ .....	13
2.3. ANTRENAREA PERCEPTUALĂ CU FEEDBACK ÎN SCOPUL DE A ÎMBUNĂTĂȚI CAPACITATEA DE LOCALIZARE A SUNETELOR .....	13
CAPITOLUL 3 .....	14
REPREZENTAREA SPAȚIAL-AUDITIVĂ ÎN CAZUL PERSOANELOR NEVĂZĂTOARE .....	14
3.1. SIMȚUL VIZUAL ȘI LOCALIZAREA SUNETULUI .....	14
3.2. COMPARAȚIE ÎNTRE EXPERIMENTELE DE LOCALIZARE A SUNETULUI CU SUBIECȚI NEVĂZĂTORI ȘI SUBIECȚI CU VEDERE NORMALĂ .....	14
CAPITOLUL 4 .....	15
JOCURI AUDIO PENTRU NEVĂZĂTORI .....	15
4.1. ASPECTE GENERALE ALE JOCURILOR AUDIO .....	15
4.2. TEHNICI DE SONIFICARE ÎN JOCURILE AUDIO .....	15
4.3. CATEGORII DE JOCURI AUDIO .....	15
4.4. JOCURI AUDIO DE NAVIGARE .....	16
CAPITOLUL 5 .....	17
APLICAȚII DEZVOLTATE PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA CAPACITĂȚII DE LOCALIZARE A SUNETELOR, EXPERIMENTE ȘI REZULTATE .....	17
5.1. Dispozitive auditive și haptice folosite în experimente .....	17
5.1.1. Căștile .....	17
5.1.2. Bentița haptică .....	17
5.2. STIMULI AUDIO UTILIZAȚI ÎN EXPERIMENTE .....	18

## CONTRIBUȚII LA PERCEPȚIA SPAȚIALĂ CU AJUTORUL SUNETELOR 3D

5.3. APLICAȚII DEZVOLTATE PENTRU EXPERIMENTE .....	18
5.3.1. Aplicația Binaural Navigation Test .....	19
5.3.2. Aplicația Visual-Auditory Perceptual Training .....	19
5.3.3. Aplicația Haptic-Auditory Feedback Training .....	20
5.4. EXPERIMENTELE DE LOCALIZARE A SUNETULUI.....	21
5.4.1. Grupuri țintă .....	21
5.4.2. Procedura experimentală .....	21
5.5. APLICAȚIA BINAURAL NAVIGATION ANALYZER.....	23
5.6. REZULTATE .....	23
5.6.1. Discuție asupra rezultatelor obținute în sesiunea de post-test .....	24
5.6.2. Discuție asupra rezultatelor obținute în sesiunea de antrenare.....	24
5.6.3. Comparație între acest studiu și alte experimente similare .....	24
5.7. CONCLUZII.....	25
CAPITOLUL 6.....	26
JOCURI AUDIO, EXPERIMENTE ȘI REZULTATE.....	26
6.1. EXPERIMENTE CU SUBIEȚI CU VEDERE NORMALĂ .....	26
6.1.1. Jocuri audio dezvoltate pentru realizarea experimentelor .....	26
6.1.2. Stimuli audio utilizați în experimente .....	28
6.1.3. Procedura experimentală .....	28
6.1.4. Rezultate .....	28
6.1.5. Discuție.....	28
6.2. ÎMBUNĂȚĂȚIREA PERFORMANȚELOR DE JOC ALE NEVĂZĂTORILOR PRIN ANTRENARE BAZATĂ PE FEEDBACK MULTIMODAL .....	29
6.2.1. Stimuli audio utilizați în experiment .....	29
6.2.2. Aplicații dezvoltate pentru experiment.....	29
6.2.3. Experimentul de localizare a sunetului.....	31
6.2.4. Rezultate .....	33
6.2.5. Concluzii.....	34
7. CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE .....	35
7.1. CONTRIBUȚIILE ORIGINALE ALE ACESTEI TEZE .....	35
7.2. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE .....	37
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	38

## CAPITOLUL 1 INTRODUCERE

### 1.1. MOTIVAȚIE

Antrenarea joacă un rol important în îmbunătățirea abilităților de localizare a sunetului în cazul persoanelor nevăzătoare. Subiecții care și-au antrenat intens capacitatea de localizare a sunetului au fost capabili să proceseze mai bine informația spațială, să navigheze și să se orienteze. De exemplu, o practică eficientă trebuie să se concentreze pe utilizarea procedurilor dinamice și interactive de antrenare și pe folosirea de instrumente funcționale, cum ar fi mediile auditive virtuale sau jocurile audio.

Deoarece aplicațiile virtuale auditive și dispozitivele asistive utilizează sunete binaurale 3D sintetizate cu ajutorul funcțiilor HRTF (Head Related Transfer Function) neindividualizate, care oferă o percepție spațial-auditivă ambiguă, am identificat nevoia de antrenare a abilităților de localizare a sunetului în cazul persoanelor cu deficiențe de vedere printr-o modalitate de învățare bazată pe feedback perceptual multimodal. Această cercetare este orientată spre studiul sunetelor binaurale, al jocurilor audio și al aplicațiilor virtuale auditive ca instrumente de reabilitare pentru persoanele cu deficiențe de vedere. În special, este axat pe dezvoltarea de metode eficiente de antrenare a capacității de localizare a sunetului în cazul nevăzătorilor, cu ajutorul feedback-ului perceptual și al interacțiunii senzoriale inter-modale.

### 1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII

La nivel mondial, mai mult de 285 de milioane de oameni suferă de deficiențe de vedere, dintre care 40 de milioane sunt complet orbi [1]. Prin urmare, ei ar avea nevoie de un dispozitiv asistiv care să-i ajute să navigheze în medii necunoscute și să le îmbunătățească abilitățile de orientare în spațiu. Acest studiu face parte dintr-un proiect de cercetare mai complex, care are ca scop dezvoltarea unui sistem asistiv pentru persoanele cu deficiențe de vedere, menit să înlocuiască simțul vizual cu o modalitate senzorială alternativă, cum ar fi auzul sau simțul tactil.

Această cercetare este orientată spre îmbunătățirea rezoluției spațial-auditivă a persoanelor nevăzătoare, prin procesul de antrenare bazată pe feedback perceptual, adaptare senzorială inter-modală (vizuală, auditivă și tactilă) și învățare procedurală. Pentru aceasta, am efectuat o serie de experimente cu persoane cu probleme de vedere și nevăzători, în scopul de a studia și compara nivelul de performanță auditiv-spațială ce se poate obține ca urmare a antrenării. Rezultatele teoretice și practice obținute în această cercetare vor fi folosite pentru crearea unei strategii eficiente care va avea ca scop îmbunătățirea preciziei de localizare a sunetului în cazul persoanelor cu deficiențe de vedere (în ceea ce privește dezvoltarea unui dispozitiv asistiv senzorial ce va oferi o percepție completă asupra mediului) și pentru proiectarea de jocuri audio, destinate atât comunității nevăzătorilor, cât și jucătorilor care nu au astfel de probleme.

### 1.3. CONTRIBUȚIILE ȘTIINȚIFICE ALE AUTORULUI ÎN LEGĂTURĂ CU ACEASTĂ TEZĂ

#### ARTICOLE PUBLICATE ÎN CADRUL CONFERINȚELOR

1. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, A. Morar*, “Realitatea Virtuală în Medicină - Realizări, Probleme și Tendințe”, ROCHI National Conference on Computer-Human Interaction, Cluj-Napoca, Septembrie 2-3, 2013
2. *A. Morar, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, V. Asavei, L. Petrescu, O. Bălan, I. Negoii, S. Hostiuc*, “Interfețe Om-Mașină Bazate pe Realitate Augmentată/virtuală și Prelucrare de Imagini în Chirurgia Minim Invazivă”, ROCHI National Conference on Computer-Human Interaction, Cluj-Napoca, Septembrie 2-3, 2013
3. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, A. Morar*, “Experiments on Training the Human Localization Abilities”, Proceedings of the 10th International Scientific Conference eLearning and Software for Education-Bucharest, Aprilie 24-25, 2014, Vol. 2, ISSN: 2066 - 026X print 2066 - 8821 online (**ISI**)
4. *A. Moldoveanu, O. Bălan*, “Training System for Improving Spatial Sound Localization”, Proceedings of the 10th International Scientific Conference eLearning and software for Education-Bucharest, Aprilie 24-25, 2014, Vol. 1, ISSN: 2066 - 026X print 2066 - 8821 online (**ISI**)
5. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “Studiu Comparativ al Principalelor Aplicații de Tipul Virtual Dressing Room”, ROCHI National Conference on Computer-Human Interaction, Constanta, Septembrie 4-5, 2014, pp. 29-34, ISSN 2344-1690
6. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, M. I. Dascălu*, “Navigational 3D Audio-Based Game - Training Towards Rich Auditory Spatial Representation of the Environment”, Proceedings of the 18th International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, Octombrie 17-19, 2014, pp. 688-693, ISBN 978-1-4799-4602-0 (**ISI, IEEE**)
7. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, M. I. Dascălu*, “Audio Games - A Novel Approach Towards Effective Learning in the Case of Visually-Impaired People”, Proceedings of the ICERI Conference, Seville, Spain, Noiembrie 17-19, 2014, pp. 6542-6548, ISBN 978-84-617-2484-0 (**ISI**)
8. *M. I. Dascălu, A. Moldoveanu, G. Dragoi, O. Bălan*, “Understanding and Improving the Usage and Impact of E-Learning in Medical Education”, Proceedings of the ICERI Conference, Seville, Spain, Noiembrie 17-19, 2014, pp. 6574-6580, ISBN 978-84-617-2484-0 (**ISI**)

## CONTRIBUȚII LA PERCEPȚIA SPAȚIALĂ CU AJUTORUL SUNETELOR 3D

9. *O. Bălan, A. Moldoveanu, A. Butean, F. Moldoveanu, I. Negoii*, “Comparative Research on Sound Localization Accuracy in the Free-Field and Virtual Auditory Displays”, Proceedings of The 11th International Scientific Conference eLearning and software for Education, Bucharest, Aprilie 23-24, 2015. **(ISI)**
10. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, I. Negoii*, “The Role of Perceptual Feedback Training on Sound Localization Accuracy in Audio Experiments”, Proceedings of The 11th International Scientific Conference eLearning and software for Education, Bucharest, Aprilie 23-24, 2015 **(ISI)**
11. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “Binaural Sound Analysis and Spatial Localization for the Visually Impaired People”, 9th International Conference on Interfaces and Human Computer Interaction, 22 – 24 Iulie 2015, Las Palmas de Gran Canaria, Spain **(ISI)**
12. *O. Bălan, A. Butean, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “Auditory and Haptic Spatial Cognitive Representation in the Case of the Visually Impaired People”, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12-16 Iulie 2015
13. *A. Butean, O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “Touchscreen Based Audio and Vibro-Tactile Applications as Assistive Systems for People Suffering from Eye Disorders”, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12-16 Iulie 2015
14. *O. Bălan, A. Moldoveanu, H. Nagy, G. Wersényi, N. Botezatu, A. Stan, R. G. Lupu*, “Haptic-Auditory Perceptual Feedback Based Training for Improving the Spatial Acoustic Resolution of the Visually Impaired People”, The 21st International Conference on Auditory Display (ICAD-2015), Iulie 8-10, 2015, Graz, Austria
15. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “3D Audio and Haptic Interfaces for Training the Spatial Acoustic Resolution in Virtual Auditory Environments”, The 21st International Conference on Auditory Display (ICAD-2015), Iulie 8-10, 2015, Graz, Austria
16. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, A. Butean*, “Developing a Navigational 3D Audio Game with Hierarchical Levels of Difficulty for the Visually Impaired Players”, a 12-a Conferință Națională de Interacțiune Om-Calculator, 24-25 Septembrie 2015, Bucharest, Romania **(ISI)**
17. *B. Troancă, A. Butean, A. Moldoveanu, O. Bălan*, “Introducing Basic Geometric Shapes to Visually Impaired People Using a Mobile App”, a 12-a Conferință Națională de Interacțiune Om-Calculator, 24-25 Septembrie 2015, Bucharest, Romania **(ISI)**

18. A. Butean, O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “ICT Evolutions Supporting the Development of Assistive Systems for Visually Impaired People”, WPA 2015 Bucharest International Congress 24 - 27 Iunie, Bucharest

**ARTICOLE PUBLICATE SAU TRIMISE LA JURNALE**

19. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, A. Morar, “Assistive IT for Visually Impaired People”, Journal of Information Systems & Operations Management, **vol.7**, no.2, 2013, pp. 391-404, ISSN 1843-4711

20. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, O.M. Ferche, “O Scurtă Clasificare a Jocurilor Audio în Contextul Îmbunătățirii Interacțiunii și Accesibilității pentru Persoanele Nevăzătoare”, Revista Română de Interacțiune Om-Calculator, **vol. 7**, no. 3, 2014, pp. 225-238, ISSN 1843-4460

21. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “Navigational Audio Games: An Effective Approach Towards Improving Spatial Contextual Learning for Blind People”, The International Journal on Disability and Human Development, **vol. 14**, no. 2, April 2015, pp. 109-118, ISSN (Online) 2191-0367, ISSN (Print) 2191-1231, DOI: 10.1515/ijdh-2014-0018

22. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “Spatial Auditory Representation in the Case of the Visually Impaired People”, Journal of Information Systems & Operations Management, **vol. 9**, no. 1, May 2015, pp. 1-11.

23. A. Butean, B. Troancă, O. Bălan, F. Moldoveanu, A. Moldoveanu, D. Chiriță, “Applications on Touchscreen Mobile Devices for Visually Impaired People”, Romanian Journal of Human-Computer Interaction, **vol. 8**, no. 2, 2015, pp. 121-138

24. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “Spatial Sound Based System for Improving Orientation and Mobility Skills in the Absence of Sight”, UPB Scientific Bulletin (**acceptat, urmează a fi publicat**)

25. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “Perceptual Feedback Training for Improving Spatial Acuity and Resolving Front-Back Confusion Errors in Virtual Auditory Environments”, Archives of Acoustics (**în curs de recenzare**) (ISI, Impact Factor = 0.65)

26. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, “A Systematic Review of the Methods and Experiments Aimed to Reduce Front-Back Confusions in the Free-Field and Virtual Auditory



## CONTRIBUȚII LA PERCEPȚIA SPAȚIALĂ CU AJUTORUL SUNETELOR 3D

Environments”, International Journal of Acoustics and Vibration (**în curs de recenzare**) (**ISI, Impact Factor = 0.37** )

27. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, “Comparative Analysis on How Multimodal Perceptual Feedback Training Improves the Spatial Auditory Performance of the Sighted and Visually Impaired People”, Archives of Acoustics (**în curs de recenzare**) (**ISI, Impact Factor = 0.65**)

28. *Ó.I. Jóhannesson, O. Bălan, R. Unnthorsson, A. Moldoveanu, Á. Kristjánsson*, “The Sound of Vision: On the Feasibility of Creating a Representation of the Auditory Environment for Spatial Navigation for the Visually Impaired”, Frontiers in Human Neuroscience (**în curs de recenzare**) (**ISI, Impact Factor= 2.9**)

29. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, G. Wersényi*, Improving the Audio Game Playing Performances of the Visually Impaired People through Multimodal Training, Journal of Visual Impairment & Blindness (**în curs de recenzare**) (**ISI, Impact Factor=0.72**).

## CĂRȚI

30. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, ICT for Visually Impaired, Printech, ISBN 978-606-23-0348-8, 2014

## PARTICIPĂRI LA SECȚIUNEA DOCTORAL CONSORTIUM

- **Nordi'CHI** 2014, 26-30 Octombrie 2014, Helsinki, Finland (rată de acceptare: 28%)
- **International Conference on Auditory Display (ICAD)**, 6-10 Iulie 2015, Graz, Austria
- The 9th International Conference on **Interfaces and Human Computer Interaction**, 22 – 24 Iulie 2015, Las Palmas de Gran Canaria, Spain (rata de acceptare: 16%)

## PREMII

- **Best Paper Award for PhD Students, The 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**, Sinaia, Romania, 17-19 Octombrie 2014

## PROIECTE DE CERCETARE

- **Sound of Vision (Natural sense of vision through acoustics and haptics)**, Horizon 2020, H2020-PHC-2014, project code 643636
- **TRAVEE (Virtual Therapist with Augmented Feedback for Neuromotor Recovery)**, PNCDII-Parteneriate, PN-II-PT-PCCA-2013-4-1580.

## 1.4. STRUCTURA TEZEI

Capitolul 2 prezintă câteva aspecte teoretice ale auzului binaural, precum și cele mai relevante metode și experimente menite a reduce rata de apariție a erorilor de tipul “front-back confusions”.

Capitolul 3 prezintă un studiu paralel asupra celor mai relevante experimente de localizare audio, cu scopul de a înțelege modul în care simțul vizual influențează capacitatea de localizare spațială a sunetelor.

În capitolul 4 este descrisă o scurtă clasificare a celor mai semnificative jocuri audio, având în vedere aspectele funcționale, mijloacele de interacțiune și strategiile de proiectare. De asemenea, sunt trecute în revistă cele mai relevante jocuri audio de navigare, discutându-se în special abordarea lor conceptuală și tehnologică, accesibilitatea și modalitatea de interacțiune cu utilizatorul.

Capitolul 5 prezintă un studiu comparativ asupra capacității de localizare a sunetului în cazul persoanelor cu și fără deficiențe de vedere. Performanța de localizare a sunetului a fost evaluată înainte, după și în timpul sesiunii de antrenament multimodal cu feedback haptic, vizual și auditiv. Rezultatele au demonstrat că atât subiecții cu vedere normală, cât și cei cu deficiențe de vedere au reușit să-și îmbunătățească rezoluția spațial-auditivă, fapt reflectat într-o acuratețe mai mare de localizare a sunetelor și o rată mai mică a confuziilor “front-back”.

Capitolul 6 prezintă două experimente ce investighează gradul în care persoanele nevăzătoare își pot îmbunătăți capacitatea de localizare a sunetului în mediul virtual, prin intermediul jocurilor audio de navigare.

Capitolul 7 sintetizează contribuțiile originale ale tezei și perspectivele viitoare de cercetare.

## CAPITOLUL 2 SUNET ȘI AUZ

### 2.1. LOCALIZAREA SPAȚIAL-AUDITIVĂ

#### 2.1.1. Principii de bază ale localizării spațial-auditive

Principalii factori care influențează percepția spațial-auditivă sunt: localizarea în planul orizontal (azimut sau unghiul dintre sursa de sunet și planul median), localizarea în planul vertical (altitudine sau unghiul dintre sursa de sunet și planul care trece prin ambele urechi, încorporând axa interaurală), estimarea distanței și spațialitatea (senzația de învăluire a sunetului în jurul corpului ascultătorului). Localizarea sunetului în mediul 3D variază în funcție de specificul sarcinii, de la indicații simple ale direcției sunetului (față-spate, stânga-dreapta) la discriminarea relativă (relativ în ceea ce privește o altă sursă de sunet sau un punct de referință) și localizarea absolută (care constă în a arăta exact direcția sursei de sunet). În categoria măsurătorilor de localizare relativă, putem distinge unghiul minim de percepție auditivă (MAA – Minimum Audible Angle), cunoscut și sub numele "localization blur" [2], care reprezintă cea mai mică diferență perceptibilă dintre poziția a două surse de sunet adiacente în planul orizontal sau vertical.

#### 2.1.2. Indicatori binaurali

Binaural înseamnă a asculta cu ambele urechi, în timp ce monaural se referă la perceperea stimulilor auditivi cu un singură ureche [3].

Indicatorii binaurali definesc direcția unghiulară a sursei de sunet în planul orizontal. Prin urmare, aceștia oferă informații despre unde și cât de departe de planul median, pe partea stângă sau dreaptă a corpului ascultătorului este poziționată sursa de sunet. Indicatorii binaurali nu pot oferi însă informații despre altitudinea sursei de sunet sau dacă aceasta este situată în față, în spate, deasupra sau sub planul transversal (orizontal) [4].

Sunetele de frecvență joasă (sub 800 Hz) sunt localizate mai bine cu ajutorul diferenței de nivel interaurale (ILD – Interaural Level Difference), în timp ce sunetele de frecvență mai mare (peste 1.6 kHz) depind într-o măsură mai mare de diferența de timp dintre momentele de sosire ale sunetului la ambele urechi (ITD – Interaural Time Difference). Aceștia sunt principalele indicatori de localizare binaurală care ghidează percepția direcțională audio în planul orizontal. Cu toate acestea, există o zonă de tranziție ambiguă de la 800 la 1600 Hz, unde ILD-ul și ITD-ul sunt observate simultan, oferind o precizie de localizare mai slabă [5]. Indicatorii de localizare în planul orizontal sunt ITD și ILD, precum și indicatorii spectrali. ITD și ILD sunt asociați localizării direcționale a sunetului, în timp ce indicatorii spectrali sunt folosiți pentru dezambiguizarea față-spate [6] (Fig. 2.1.).

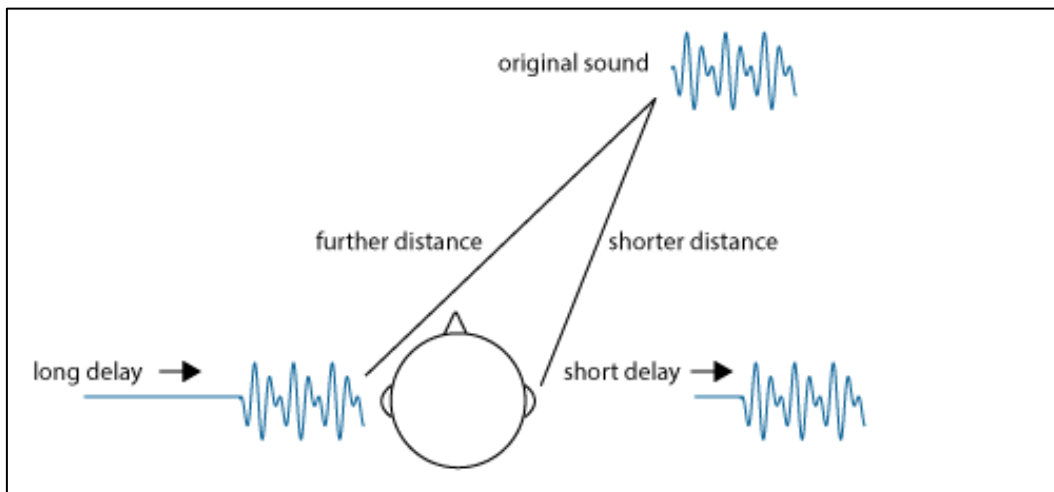


Fig. 2.1. Diferența de timp interaurală (**Interaural Time Difference – ITD**) [7]

### 2.1.3. Indicatori monaurali

#### HEAD RELATED TRANSFER FUNCTION

Funcția Head Related Transfer Function (HRTF) este un răspuns care determină modul în care urechea percepe stimulii audio ce sosesc dintr-un anumit punct din spațiu. Este o funcție ce descrie direcția undelor sonore între sursă și ureche (trecând prin canalul auditiv, la timpan). Perechea de HRTF-uri corespunzătoare urechii stângi și drepte desemnează modul în care sursa de sunet este percepută de către ascultător [8].

În cazul în care HRTF-urile sunt cunoscute, este mai ușor să se sintetizeze o scenă dintr-un mediu virtual auditiv care să ofere ascultătorului aceeași percepție pe care ar produce-o o sursă în mediul real [9]. În condiții de izolare fonică, filtrarea semnalului audio cu perechea corespunzătoare (stânga și dreapta) a HRTF-urilor ce sunt caracteristice unei anumite direcții în spațiu oferă aceeași percepție auditivă ca și cum s-ar asculta acel sunet în mediul real. Mai mult decât atât, se produce senzația de a fi cufundat în spațiul exocentric nu numai prin filtrarea sunetului cu HRTF-urile de pe direcția sursei, ci, de asemenea, și prin introducerea de reverberații, reflecții și indicatori de mișcare care să ofere o percepție mai realistă a mediului virtual [10].

HRTF-urile sunt puternic individualizate, depinzând de caracteristicile anatomice, de asimetria capului și de amplasarea urechilor ascultătorului. Diferențele specifice în anatomia urechii, a capului și a corpului (în ceea ce privește atât dimensiunea, cât și forma) nu permit utilizarea aceluiași HRTF-uri pentru toți ascultătorii [8], [9].

### 2.1.4. Erori de localizare de inversare

Erorile de localizare de inversare reprezintă decizii de localizare care indică în direcția opusă decât poziția reală a sursei de sunet. Ascultătorul face o presupunere ambiguă în ceea ce privește locația semnalului audio de intrare, arătând spre imaginea sa în oglindă față de axa interaurală. De exemplu, pentru o sursă de sunet situată la 30 de grade în emisfera frontală, ascultătorul poate percepe poziția acesteia la 150 de grade în spate [11].

Erorile de inversare sunt cauzate de forma sferică a capului, de reflecțiile mediului, de interferențele cu alte obiecte sau sunete și de modificările în spectrul undelor, cauzate de nivelurile identice ale ILD și ITD, mai ales în situația în care sunetul este redat prin căști.

### **2.2. ACURATEȚEA DE LOCALIZARE SPAȚIAL-AUDITIVĂ**

Testele de localizare a sunetului, care evaluează abilitățile discriminatorii spațiale umane, variază considerabil în abordările lor metodologice, obiectivele urmărite, procedurile experimentale și paradigmele de localizare. În aplicațiile virtuale auditive, ascultătorilor le sunt prezentate diverse tipuri de sunete, prin intermediul căștilor (clickuri, zgomote, tonuri pure) și li se cere să indice poziția sursei de sunet. Acest tip de procedură experimentală este numită "lateralizare" (percepția sursei de sunet situate în cap) [2] și, prin urmare, are o abordare diferită decât termenul "localizare", care desemnează percepția aparentă în ambele direcții și estimarea distanței (percepția spațiului din jurul ascultătorului) [12].

Sistemul auditiv uman este capabil să combine indicatorii binaurali și monaurali într-o imagine auditivă unitară și coerentă a spațiului. Totuși, se consideră că aceste informații sunt dobândite și cu ajutorul simțului vizual, care oferă feedback senzorial și reglementează modul în care creierul construiește întreaga reprezentare spațială a mediului [13], [14].

### **2.3. ANTRENAREA PERCEPTUALĂ CU FEEDBACK ÎN SCOPUL DE A ÎMBUNĂȚI CAPACITATEA DE LOCALIZARE A SUNETELOR**

În scopul de a reduce incidența erorilor de localizare, s-a demonstrat faptul că este necesară o perioadă de adaptare la condițiile distorsionate de redare audio, pentru ca ascultătorii să se obișnuiască cu caracteristicile noii experiențe auditive (caracteristici temporale și spectrale diferite față de cele așteptate de sistemul auditiv al ascultătorului, percepție de localizare în interiorul capului sau dificultăți de estimare a distanței). În afară de aceasta, majoritatea experimentelor de localizare a sunetului iau în calcul sesiuni de antrenare (generic denumite ca "efectul de învățare"), cu scopul de a-i familiariza pe subiecți cu percepția sunetelor 3D (în special în cazul subiecților neexperimentați), cu cerințele și sarcinile experimentului. Particularitatea acestei metode constă în faptul că ascultătorii învață cum să se adapteze la HRTF-urile neindividualizate, în loc ca HRTF-urile să se modifice pentru a se potrivi caracteristicilor de percepție a sunetului specifice fiecărui ascultător în parte [15], [16].

### **CAPITOLUL 3**

## **REPREZENTAREA SPAȚIAL-AUDITIVĂ ÎN CAZUL PERSOANELOR NEVĂZĂTOARE**

### **3.1. SIMȚUL VIZUAL ȘI LOCALIZAREA SUNETULUI**

Persoanele nevăzătoare sunt dependente de informația auditivă, deoarece aceasta le permite să identifice atributele mediului, să recunoască obiectele familiare sau nefamiliare și să gestioneze în mod eficient informația spațială. De-a lungul anilor, s-a susținut ideea că oamenii cu deficiențe de vedere beneficiază de abilități foarte dezvoltate de orientare în spațiu, ca urmare a procesului de plasticitate inter-modală [17]. Mai multe studii au demonstrat abilități de localizare a sunetului crescute în cazul persoanelor ce și-au pierdut simțul vizual la începutul vieții, alții au ajuns la concluzia că nu există nici o diferență între nevăzători și cei cu vedere normală, subliniind faptul că simțul vizual nu este responsabil pentru percepția spațial-auditivă, în timp ce alții au dovedit că persoanele cu deficiențe de vedere sunt mai puțin eficiente decât cele cu vedere normală în ceea ce privește localizarea sunetului și discriminarea spațială [18].

Documentarea prezentată în acest capitol a fost publicată în [18] și [19].

### **3.2. COMPARAȚIE ÎNTRE EXPERIMENTELE DE LOCALIZARE A SUNETULUI CU SUBIECȚI NEVĂZĂTORI ȘI SUBIECȚI CU VEDERE NORMALĂ**

Acest subcapitol își propune să prezinte cele mai relevante experimente de localizare a sunetului care au implicat participarea subiecților cu vedere normală și cu deficiențe de vedere. Deoarece studiile au ajuns la concluzii diferite, le-am clasificat în experimente care prezintă abilități de localizare fie mai bune, fie mai slabe în cazul persoanelor nevăzătoare, cât și în experimente care susțin o percepție de localizare auditivă aproximativ identică în cazul celor două grupe de subiecți.

Rezultatele acestor experimente au demonstrat că persoanele nevăzătoare posedă abilități sporite de localizare a sunetului în planul orizontal (în timp ce subiecții cu deficiențe de vedere sunt mai competenți în a discrimina direcția din care provine sunetul în planul vertical) și pentru îndeplinirea sarcinilor de localizare spațială în condiții monaurale. Mai mult decât atât, subiecții nevăzători sunt mai preciși în a diferenția direcția din care provine sunetul în regiunea periferică a spațiului auditiv, mai ales datorită faptului că acest comportament este vital pentru adaptarea și navigarea în situații reale. S-a demonstrat de asemenea că indivizii nevăzători sunt capabili să identifice mai rapid direcția sunetului decât caracteristicile sale spectrale. Aceasta este o consecință evidentă a deprinderii de simțul vizual, deoarece pentru ei este mult mai important să reacționeze la locația stimulilor (de exemplu, sunetul unei mașini care se apropie) decât de să distingă tipul de zgomot pe care aceasta îl produce [20]. Pe de altă parte, au existat mai multe studii care au raportat rezultate identice sau o capacitate de localizare a sunetului mai redusă în cazul indivizilor nevăzători. [18].

## CAPITOLUL 4 JOCURI AUDIO PENTRU NEVĂZĂTORI

Acest capitol prezintă o trecere în revistă a jocurilor audio pentru nevăzători. Conținutul acestui capitol a fost publicat în [21], [22] și [23].

### 4.1. ASPECTE GENERALE ALE JOCURILOR AUDIO

Cum majoritatea jocurilor pe calculator disponibile pe piață astăzi se bazează pe interfețe grafice, persoanele cu deficiențe de vedere au acces restrâns la acestea. Creșterea rapidă a consumului de tehnologie multimedia și necesitatea unei surse accesibile de divertisment pentru nevăzători a condus la dezvoltarea unei noi categorii de jocuri, aceea a jocurile audio.

### 4.2. TEHNICI DE SONIFICARE ÎN JOCURILE AUDIO

Sunetul are un rol foarte important în jocurile pe calculator, făcându-l pe utilizator să se simtă cufundat în acțiune și oferindu-i informații relevante cu privire la prezența altor obiecte și personaje. De asemenea, acesta produce senzații emoționale, "declanșând sentimente și amintiri" [24].

În aplicațiile virtuale auditive, tehnicile de sonificare sunt utilizate pentru a reprezenta diverse acțiuni, obiecte și situații și pentru a descrie povestea. În acest fel, imaginea de ansamblu a jocului este tradusă în stimuli auditivi, ceea ce face ca modalitatea de interacțiune cu mediul virtual să devină accesibilă persoanelor cu deficiențe de vedere.

Sunetul 3D este foarte eficient pentru transferul de informații direcționale, mai ales în jocurile de navigație. Muzica și sunete ambientale stabilesc atmosfera generală de fundal, reușesc să comunice informații cu privire la aspectele emoționale ale jocului (situații amuzante, plăcute, interesante, de acțiune, divertisment sau groază) și contribuie la progresia ritmică și temporală a acțiunii (lentă, moderată sau rapidă).

### 4.3. CATEGORII DE JOCURI AUDIO

Jocurile audio sunt împărțite în diverse categorii, în funcție de modalitatea de interacțiune. Principalele tipuri de jocuri audio sunt: de acțiune, de aventură, puzzle și de strategie.

Jocurile de acțiune necesită o atenție sporită și o capacitate de sincronizare deosebită din partea utilizatorului. Viteza de reacție și capacitatea de interacțiune sunt foarte importante, deoarece rezultatul jocului este strict legat de feedback-ul rapid al jucătorului.

Jocurile de aventură au următoarele caracteristici: o acțiune interesantă, activități bazate pe navigare și explorare și existența unui mister ascuns care trebuie să fie descoperit. Un exemplu relevant de joc narativ de aventură este Hidden Secret [25].

Jocurile de strategie necesită ca jucătorul să gestioneze situații diferite și să fie capabil să manipuleze eficient resursele alocate. Jocurile de tip puzzle îmbunătățesc memoria, atenția și stimulează procesele cognitive ale creierului. De exemplu, jocul audio de tip puzzle denumit Jigsaw (descriș în [26]) are ca scop reconstituirea unei melodii fragmentate în piese audio aleatorii.

O altă categorie de jocuri audio sunt jocurile sportive. De exemplu, Audio Soccer [27] se adresează persoanelor nevăzătoare, ajutându-i să joace fotbal cu ajutorul sunetelor. Sunetele 3D definesc mișcările mingei și acțiunile jucătorului (pasă, atac, apărare). Orientarea acestuia

și poziționarea sa în spațiu sunt generate ca răspuns la sunetele produse de ceilalți jucători (prin ecou) [21], [23].

### **4.4. JOCURI AUDIO DE NAVIGARE**

În cazul persoanelor nevăzătoare, dezvoltarea abilităților de navigare se bazează pe modalitățile senzoriale rămase, cum ar fi simțul auditiv și tactil. Cum simțul tactil este limitat la perceperea obiectelor din jur, auzul este un canal senzorial mai puternic, datorită capacității sale mai mari de asimilare și procesare a informației de intrare. Se consideră că absența simțului vizual este compensată de o dezvoltare intensă a simțurilor rămase, fapt pentru care jocurile audio se dovedesc a fi o tehnică eficientă de reabilitare, formare și testare a aptitudinilor de navigare ale subiecților cu deficiențe de vedere, în cadrul unui mediu virtual captivant, centrat pe îmbunătățirea experienței utilizatorului.

Jocurile audio de navigare ajută la dezvoltarea abilităților cognitive și stimulează învățarea contextuală. Mai mult decât atât, învățarea contextuală poate fi transferată cu succes în lumea reală, crescând gradul de percepție senzorială a utilizatorilor și în afara mediului virtual.



## CAPITOLUL 5

### APLICAȚII DEZVOLTATE PENTRU ÎMBUNĂȚĂȚIREA CAPACITĂȚII DE LOCALIZARE A SUNETELOR, EXPERIMENTE ȘI REZULTATE

Acest capitol prezintă un studiu comparativ cu privire la gradul de îmbunătățire spațial-auditivă obținută de un grup de indivizi cu și fără deficiențe de vedere care au participat la două experimente de localizare a sunetului ce au cuprins o procedură de antrenare bazată pe feedback multimodal. Performanța de localizare a sunetului a fost evaluată înainte (în pre-test), după (în post-test) și în timpul sesiunilor de antrenare. Rezultatele au demonstrat că atât persoanele cu deficiențe de vedere, cât și subiecții cu vedere normală au reușit să-și îmbunătățească rezoluția spațială, fapt ce a fost reflectat într-o precizie mai mare de localizare, o rată mai mică a confuziilor față-spate și o capacitate crescută de navigare și orientare în mediul auditiv virtual, unde sunetele 3D au fost sintetizate folosind HRTF-uri neindividualizate. Procedurile experimentale și rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în [28], [29], [30], [31] și [32].

#### 5.1. Dispozitive auditive și haptice folosite în experimente

##### 5.1.1 Căștile

Stimulii auditivi au fost furnizați printr-o pereche de căști stereofonice (Sony MDRZX310L, căști deschise, cu nici o corecție externă a caracteristicilor de frecvență). Nivelul sunetului a fost setat a fi confortabil pentru ascultător, având în medie în jur de 65-70 dB SPL [30].

##### 5.1.2 Bentița haptică

Dispozitivul haptic, care a fost folosit în experimentul cu nevăzătorii, este controlat wireless de o aplicație la distanță ce rulează pe calculator. Acesta este ușor de utilizat și poate fi adaptat la activități sau scenarii reale de cercetare.

Dispozitivul este compus din următoarele părți [28]:

- Un dispozitiv USB Wireless-Gateway (UWGD), care permite sistemului să fie controlat de PC (se conectează la PC prin USB).
- Dispozitivul de acționare tactil (HAD – Haptic Actuator Device), care controlează elementele de acționare haptice (Eccentric Rotation Mass - motoare ERM), prin primirea comenzilor de la UWGD și executarea acestora.
- 24 motoare cu vibrații, dintre care doar 12 au fost utilizate - fiecare motor este fixat de-a lungul un bețișor pentru a fi mai ușor de manevrat. Pe măsură ce numărul de rotații este mai mare, motoarele sunt deplasate de forțele asimetrice, provocând o mișcare repetată ce este percepută ca o vibrație [33], [34]. Motoarele cu vibrații au fost dispuse la 30 de grade distanță pe bentița haptică, de jur-împrejurul capului ascultătorului. Structura dispozitivului haptic este prezentată în Fig. 5.1. [28], [31].

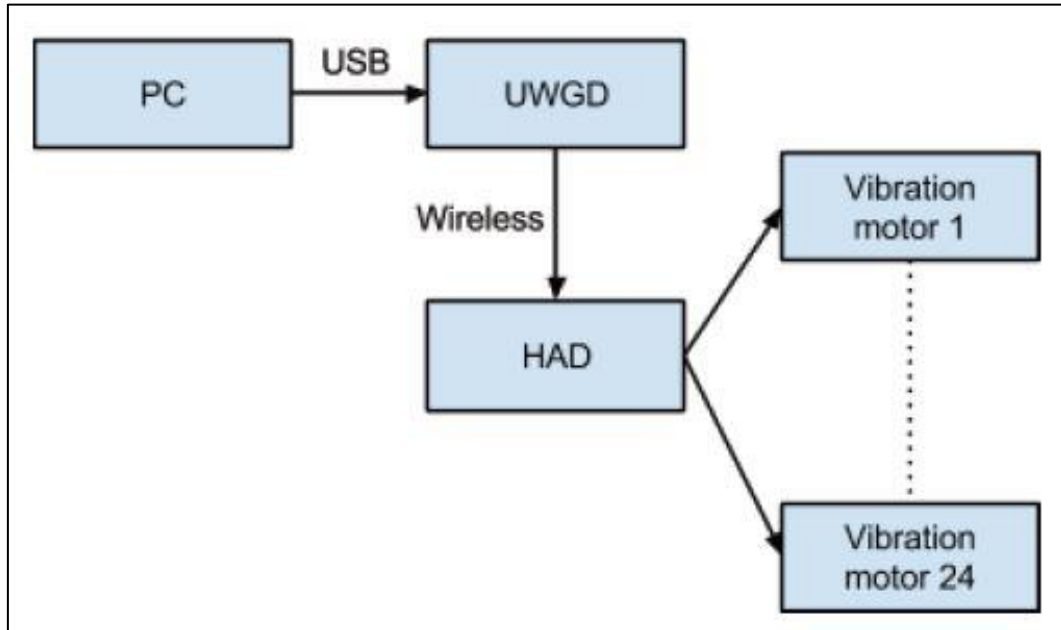


Fig. 5.1. Structura bentiței haptice

Un exemplu de comandă este "S01400100 \ X0A", ceea ce înseamnă că motorul cu numărul 01 este activat cu tipul de vibrație 40 de 01 ori.

## 5.2. STIMULI AUDIO UTILIZAȚI ÎN EXPERIMENTE

Tehnica de sonificare are ca scop reducerea numărului de erori de inversare (confuzii față-spate și spate-față) în mediul auditiv virtual, folosind o metodă bazată pe colorarea spectrală a sunetului, ce constă în a asculta simultan două tipuri de zgomote cu caracteristici spectrale diferite (zgomot alb și roz). Stimulii audio utilizați în experimente sunt o combinație de zgomot alb și roz, care au fost percepute simultan, dar la niveluri diferite, în funcție de direcția sursei de sunet în spațiu.

Formula de calcul a nivelului perceput de zgomot alb și roz pentru un anumit unghi în planul orizontal este:

$$\begin{aligned} roz &= unghi / 180; alb = 1 - roz; (0 \leq unghi \leq 180) \\ alb &= (unghi - 180) / 180; roz = 1 - alb; (180 < unghi < 360) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Pe lângă combinația de zgomot alb-roz, un sunet discret și repetitiv de tipul "ding" (cu 250 ms pauze între două emiteri consecutive) a fost folosit în experimentele noastre.

Atât combinația de zgomot alb-roz, cât și sunetul "ding" au fost sintetizate în timp real cu HRTF-urile neindividualizate din baza de date MIT [35], folosind limbajul de programare Csound pentru procesarea sunetului [36].

## 5.3. APLICAȚII DEZVOLTATE PENTRU EXPERIMENTE

Aplicațiile descrise în această secțiune au fost dezvoltate în mediul de dezvoltare integrat Microsoft Visual [37], cu ajutorul limbajului de programare C# [38]. De asemenea, ele folosesc stimulii auditivi prezentați în subcapitolul anterior.

### 5.3.1. Aplicația Binaural Navigation Test

Aplicația Binaural Navigation Test (Fig. 5.2.) a fost concepută cu scopul de a realiza secțiunile de pre-test și post-test ale experimentelor descrise în acest capitol.

În această aplicație, subiecților li s-a cerut să identifice poziția sursei de sunet 3D prin navigare liberă (folosind touchpad-ul sau mouse-ul ca modalitate de interacțiune) din poziția de pornire (care a fost generată aleator pe marginea unui cerc cu raza de 150 pixeli) la sursa de sunet (situată chiar în centrul cercului). Zona audibilă a fost un cerc cu raza de 200 pixeli în jurul poziției sursei de sunet.

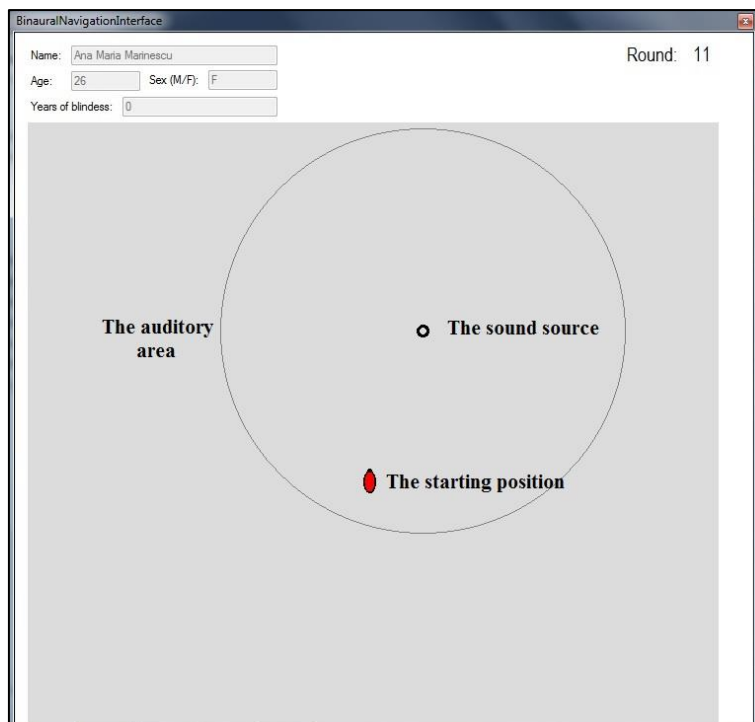


Fig. 5.2. Aplicația Binaural Navigation Test

Tehnica de sonificare se bazează pe codarea invers proporțională a distanței, astfel încât intensitatea sunetului crește atunci când utilizatorul se apropie de sursă, micșorându-se atunci când acesta se îndepărtează (atinge valoarea 0 în afara zonei audibile de 200 pixeli).

### 5.3.2. Aplicația Visual-Auditory Perceptual Training

Aplicația Visual-Auditory Perceptual Training [30] oferă feedback vizual și auditiv în legătură cu direcția sursei de sunet în spațiu. Această aplicație a fost utilizată în experimentul cu subiecții cu deficiențe de vedere. Ea are trei module:

a) Un modul în care subiecților li s-a cerut să miște liber cursorul mouse-ului / touchpad-ului în interiorul unui cerc și în același timp să audă sunetul corespunzător unghiului dintre centrul cercului (considerat ca fiind poziția fixă a ascultătorului) și locația din interiorul cercului determinată de mișcare. Sunetele folosite au fost combinația de zgomot alb și roz și sunetul “ding”.

b) Un modul cu 2 niveluri de dificultate, care prezintă o procedură de discriminare a sunetului. În cadrul primului nivel, numărul de surse de sunet virtuale este limitat la patru, iar în al doilea nivel la opt, pentru ambele tipuri de sunete. În primul nivel, patru surse de sunet

sunt generate aleatoriu în fiecare dintre cele patru cadrane ale spațiului auditiv. În al doilea nivel, numărul de obiective se extinde la opt (două surse de sunet în fiecare cadran). Pentru fiecare nivel, toate sursele apar pe ecran ca mici cercuri cu raza de 5 pixeli. Subiecților li s-a cerut să asculte sunetele binaurale corespunzătoare celor 4 sau 8 surse și să indice direcția percepută printr-un click pe cercul corespunzător sursei curente. Atunci când subiectul face o alegere corectă, cercul asociat sursei active dispare, reducând astfel intervalul de cautare pentru următoarele sunete.

c) Un modul de localizare a sunetului, în care utilizatorii trebuie să indice direcția sursei curente. Subiecții primesc feedback auditiv și vizual - direcția corectă a sursei curente este prezentată pe ecran (colorată în verde), împreună cu direcția specificată de subiect (colorată în roșu) (Fig. 5.3.). Apoi, sunetul este redat prin căști, cu scopul de a recalibra simțurile vizual și auditiv și pentru a crea o asocieră solidă între percepția sunetului 3D și direcția corectă a sursei. Astfel, subiectul poate vedea pe ecran direcția corectă a sursei de sunet, în timp ce ascultă la căști sunetul curent.

Aplicația conține 10 runde consecutive în care stimulii auditivi sunt reprezentați de combinația de zgomot alb și roz și alte 10 runde care folosesc sunetul "ding". Sunetul este redat în mod continuu, astfel încât subiecților le este oferită o percepție completă a spațiului auditiv virtual.

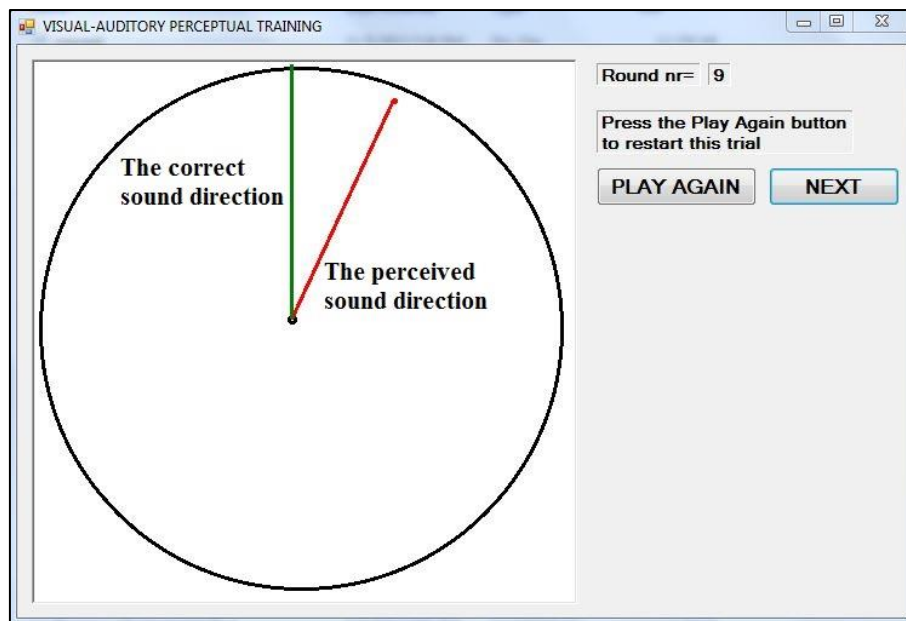


Fig. 5.3. Feedback vizual în ceea ce privește direcția sursei de sunet în spațiu

### 5.3.3. Aplicația Haptic-Auditory Feedback Training

Aplicația Haptic-Auditory Feedback Training [28], [31] oferă subiecților feedback auditiv și haptic cu privire la direcția sunetului în spațiu.

Această aplicație a fost utilizată în experimentul cu subiecții cu deficiențe de vedere. Fiecare subiect a ascultat 12 sunete (care corespund direcțiilor 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 și 330 de grade) și li s-a cerut să indice direcția din care provine sunetul cu ajutorul notației de pe cadranul ceasului (de exemplu, ora 12 pentru 0 grade în față, ora 3 pentru 90 de grade la dreapta sau ora 6 pentru 180 de grade în spate). Sunetele 3D sunt prezentate în mod continuu, în scopul de a oferi ascultătorilor o percepție completă a spațiului auditiv. Subiecții primesc feedback perceptual cu privire la direcția corectă a sursei de sunet

printr-o serie de vibrații produse de bentița haptică pe care o poartă pe cap, și în același timp feedback auditiv, cu scopul de a realiza o asociere eficientă între sunetul 3D curent și direcția din care acesta provine.

Aplicația are 12 runde în care ascultătorilor li se cere să asculte sunete 3D – 12 runde, combinația de zgomot alb și roz și alte 12 runde, sunetul “ding”. Deoarece capul nu are o formă sferică perfectă, iar dimensiunile variază între indivizi, a trebuit să aranjăm poziția motoarelor haptice pe capetele participanților la fiecare rundă, asigurându-ne că acestea se potrivesc direcțiilor corespunzătoare.

### 5.4. EXPERIMENTELE DE LOCALIZARE A SUNETULUI

Acest studiu a cuprins mai multe sarcini de localizare a sunetului. Pentru ambele grupe de subiecți (cu și fără deficiențe de vedere), procedura experimentală a inclus o sesiune de pre-test (unde s-a folosit aplicația Binaural Navigation Test), o sesiune de antrenare (cu scopul de a-i ajuta pe subiecți să se adapteze la percepția sunetelor binaurale 3D sintetizate cu HRTF-uri neindividualizate) și o sesiune de post-test, care este identică cu procedura de pre-test, având ca scop evaluarea nivelului de îmbunătățire a capacității de localizare a sunetului dobândit după sesiunea de antrenament. Experimentul cu subiecții cu vedere normală a avut loc în Ploiești, România, în decembrie 2014, în timp ce experimentul cu persoanele cu deficiențe de vedere a fost efectuat în Győr, Ungaria, în februarie 2015 [31].

#### 5.4.1. Grupuri țintă

Nouă subiecți cu vedere normală (6 femei și 3 bărbați care trăiesc în Ploiești, România) și alte nouă persoane cu deficiențe de vedere: 6 femei și 3 bărbați care trăiesc în Győr, Ungaria, cu un procent al acuității vizuale variind între 0% și 20% - un subiect era nevăzător din naștere, altul avea deficiențe vizuale congenitale (15% vedere), în timp ce ceilalți 7 sufereau de anumite forme de deficiențe de vedere pentru o perioadă cuprinsă între 6 și 20 de ani.

Niciunul dintre subiecți nu ascultase sunete binaurale 3D înainte și nici nu luase parte la vreun alt experiment de localizare. Ambele grupuri de participanți au raportat auz normal.

#### 5.4.2. Procedura experimentală

##### SESIUNILE DE PRE-TEST ȘI POST-TEST ALE EXPERIMENTULUI

În sesiunile de pre-test și post-test ale ambelor experimente, performanțele de localizare a sunetului și abilitățile de navigare ale subiecților cu și fără deficiențe de vedere au fost testate folosind aplicația Binaural Navigation Test [28], [30], [31].

Atât sesiunea de pre-test, cât și cea de post-test au fost formate din două blocuri de test. Fiecare bloc avut 20 de runde - rundele numerotate de la 1 la 5 și de la 11 la 15 au utilizat combinația de zgomot alb-roz, în timp ce rundele numerotate de la 6 la 10 și de la 16 la 20 au folosit sunetul de tipul "ding".

Parametrii studiați au fost:

- P1: Raportul dintre distanța parcursă de ascultător și distanța minimă posibilă de 150 pixeli (raza cercului care cuprinde sursa de sunet țintă);
- P2: Procentul de decizii corecte luate de utilizator, definite ca mișcări efectuate către sursa de sunet, minimizând distanța dintre locația virtuală a utilizatorului și poziția sursei de sunet curente;

- P3: Timpul mediu de finalizare al unei runde (în secunde), adică perioada de timp care a trecut de la momentul în care subiectului i-a fost prezentat sunetul până când acesta a atins sursa țintă.

### SESIUNEA DE ANTRENARE

În cazul experimentului cu subiecții fără deficiențe de vedere [30], sesiunea de antrenare a fost extinsă pe parcursul a 2 zile. În fiecare din cele două zile, ascultătorii au trebuit să utilizeze aplicația de training, după cum urmează:

a). Modulul de ascultare liberă, menit să îi ajute pe subiecți să se obișnuiască cu percepția sunetelor 3D a fost folosit atâta timp cât ei au considerat că le este necesar (în medie, timp de 3 minute).

b). Modulul de discriminare al surselor de sunet cu grad variat de dificultate, precum și aplicația de localizare a sunetului în cadrul căreia subiecților li s-a cerut să indice direcția surselor prin punctarea pe ecran în interiorul cercului a fost folosită de două ori.

În cazul subiecților cu deficiențe de vedere [28], [29], [31], [32], sesiunea de antrenare (care a fost efectuată în 2 zile consecutive, de două ori pe zi) a fost compusă din următoarele două sarcini:

a) Un modul liber de ascultare, în care cercetătorul muta cursorul mouse-ului în interiorul unui cerc, iar ascultătorul putea auzi sunetul corespunzător unghiului dintre centrul cercului (poziția virtuală a ascultătorului) și poziția variabilă a cursorului mouse-ului, folosind ca stimuli auditivi ambele tipuri de sunete - combinația de zgomot alb-roz și sunetul "ding".

b) Procedura de localizare a sunetului implementată în aplicația Haptic-Auditory Feedback Training (Fig. 5.4.).



**Fig. 5.4.** Subiect cu deficiențe de vedere în timpul sesiunii de antrenare

Pentru sesiunea de antrenare, parametrii studiați au fost rata erorilor de inversare (procentul de confuzii față-spate și spate-față, pentru fiecare bloc de test) și eroarea de localizare medie (definită ca diferența dintre direcția corectă a sursei de sunet și direcția percepută de ascultător, în valoare absolută).

## 5.5. APLICAȚIA BINAURAL NAVIGATION ANALYZER

Aplicația Binaural Navigation Analyzer (Fig. 5.5.) [30], [31] permite redarea audio și vizualizarea în timp real a performanțelor utilizatorilor pentru fiecare rundă a sesiunilor de pre-test și post-test, pentru ambele experimente. Segmentele considerate ca "mișcări bune" sunt colorate în verde, în timp ce acelea care corespund "mișcărilor greșite" sunt colorate în roșu. O metodă de vizualizare alternativă colorează traseul parcurs de către subiecți în nuanțe progresive de gri, de la sursă la destinație. Prin apăsarea butonului "Browse log file", evaluatorul poate încărca fișierele "log" ce conțin rezultatele sesiunilor de test pentru fiecare subiect în parte. Interfața afișează de asemenea valorile medii pentru toți parametrii studiați, pentru cele 10 runde care utilizează zgomotul alb/roz și pentru cele 10 runde care folosesc sunetul "ding", precum și pentru toate cele 20 de runde. Butonul "Export all data" permite ca datele să fie salvate într-un fișier Excel pentru a fi evaluate în cadrul unor analize suplimentare.

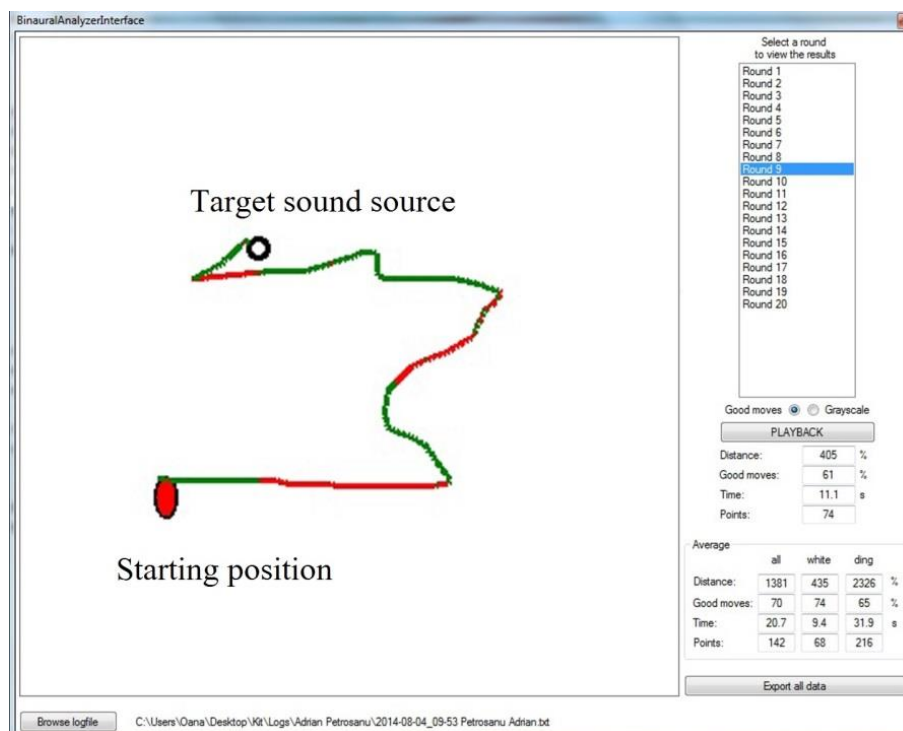


Fig. 5.5. Aplicația Binaural Navigation Analyzer

## 5.6. REZULTATE

Rezultatele furnizate de experimentele noastre au demonstrat o îmbunătățire rapidă a preciziei de localizare a sunetului și o reducere a erorilor față-spate, pentru ambele grupe de subiecți. Considerăm că acest lucru se datorează procedurii de învățare – astfel, subiecții au învățat cum să identifice caracteristicile spectrale ale sunetului (în special pentru combinația de zgomot alb-roz) - și metodei de antrenare, bazate pe feedback perceptual multimodal.

### 5.6.1. Discuție asupra rezultatelor obținute în sesiunea de post-test

În sesiunile de post-test ale experimentelor, nivelul de îmbunătățire înregistrat de subiecții cu deficiențe de vedere este mai mare decât al celor fără probleme vizuale (pentru parametrii P1 și P3), pentru rundele în care s-a folosit combinația de zgomot alb și roz în proporții variabile. Pentru rundele în care semnalul audio a fost reprezentat de sunetul "ding", gradul de îmbunătățire este mai mare pentru subiecții fără deficiențe de vedere (pentru parametrii P1 și P3), cu toate că participanții cu deficiențe au reușit să obțină un procent de îmbunătățire mai mare pentru P2. Pentru ambele tipuri de stimuli, pentru toți cei trei parametri studiați (exceptând sunetul "ding", pentru parametrul P3), procentul de subiecți cu deficiențe de vedere care au înregistrat o îmbunătățire semnificativă în sesiunea post-test a experimentului este egală sau mai mare decât cea a persoanelor fără astfel de probleme, demonstrând că nivelul de adaptare spațial-auditivă este mai mare în cazul subiecților ce suferă de un anumit grad de handicap vizual [30], [31].

### 5.6.2. Discuție asupra rezultatelor obținute în sesiunea de antrenare

În a doua zi de antrenament, subiecții cu deficiențe de vedere i-au depășit pe cei din celălalt grup în ceea ce privește gradul de îmbunătățire al erorilor de localizare și al confuziilor față-spate. De asemenea, numărul subiecților care au obținut o performanță de localizare a sunetului mai bună ca urmare a etapei de antrenare a fost mai mare în cazul grupului de indivizi cu deficiențe de vedere (cu excepția rundelor în care a fost utilizat sunetul "ding", acolo unde subiecții fără probleme de vedere au înregistrat un nivel mai ridicat de îmbunătățire decât cei cu deficiențe de vedere pentru parametrul "rata erorilor de inversare").

Considerăm că procesul de adaptare care a avut loc în timpul sesiunii de antrenare a fost axat pe a învăța cum să recunoască caracteristicile spectrale ale stimulilor auditivi, ca indicatori ai poziției spațiale a sursei de sunet. Subiecții au reușit să-și îmbunătățească rezoluția spațial-auditivă într-un timp scurt, fapt care poate fi explicat printr-o atenție sporită acordată profilului spectral al sunetelor în timpul fazei de antrenare. Aceste rezultate se datorează faptului că zgomotul alb și cel roz este mai puternic exteriorizat decât sunetul "ding", iar zgomotele cu lățime de bandă mai largă conțin mult mai multe informații spectrale ce facilitează procesul de localizare. De asemenea, combinația de zgomot alb și roz a fost redată continuu, oferind o percepție auditivă completă, în timp ce sunetul "ding" a fost discret și repetitiv [30], [31].

### 5.6.3. Comparație între acest studiu și alte experimente similare

Rezultatele experimentului nostru sunt mai bune decât cele obținute de Blum et al [16], care au înregistrat pentru grupul lor de subiecți o eroare medie de precizie de 29 de grade și o rată a confuziilor față-spate de 25% după sesiunea de antrenament. În mod similar, rezultatele noastre sunt comparabile cu cele prezentate de Majdak et al [39], care au înregistrat o eroare de precizie de 23.3 grade înainte de antrenament și de 19.8 grade după procedura de adaptare bazată pe feedback vizual și auditiv.

În ceea ce privește rata confuziilor față-spate, rezultatele noastre sunt mai bune decât cele obținute de Parseihian și Katz [40], care au înregistrat o reducere a ratei confuziilor față-spate de la 25-27% la 11% în sesiunea de post-test a experimentului lor. De asemenea, am înregistrat o incidență mai mică a erorilor de inversare (pentru ambele grupe de subiecți) decât Zahorik et al [41], care au obținut o reducere de la 38% la 23% a ratei confuziilor față-spate după 2 sesiuni de antrenare de 30 de minute fiecare, în care subiecților le-a fost furnizat feedback auditiv, vizual și proprioceptiv. Mai mult decât atât, rezultatele noastre sunt mai



bune decât cele ale lui Wenzel [42], care a înregistrat o rată medie a confuziilor față-spate de 32% (variind de la 20% la 43%) în mediul virtual auditiv și comparabile cu rezultatele ei în condiții de ascultare în câmp liber (o rată medie a erorilor de inversare de 6.5%, variind de la 2% la 10%). În plus, performanța subiecților noștri este mai bună decât cea a subiecților care au participat la experimentul lui Padersen și Jorgensen [43], care au înregistrat o rată a confuziilor față-spate de 21.3% pentru stimuli cu o durată de 250 ms (zgomot alb). De asemenea, rezultatele noastre sunt chiar mai bine decât rata medie a erorilor de inversare obținute de aceștia în condiții de ascultare în câmp liber (9.1%) pentru același tip de stimuli auditivi [30], [31].

### 5.7. CONCLUZII

Acest studiu a demonstrat faptul că sistemul auditiv uman este capabil să se adapteze rapid la condiții audio modificate, cum ar fi să asculte sunete binaurale 3D filtrate cu HRTF-uri neindividualizate. Procesul de adaptare a fost rezultatul unei asocieri perceptuale multimodale între simțurile vizual și auditiv (în ceea ce privește subiecții cu vedere normală) sau între simțul tactil și cel auditiv (fiind cazul participanților cu deficiențe de vedere). Ambele grupuri de subiecți au reușit să-și îmbunătățească capacitatea de localizare a sunetului prin reducerea ratei medii a erorilor de localizare și a confuziilor față-spate pentru ambele tipuri de stimuli (cu rezultate semnificativ mai bune pentru rundele în care a fost utilizată combinația de zgomot alb și roz). Deși subiecții cu vedere normală i-au depășit pe cei nevăzători în ceea ce privește cele mai multe dintre sarcinile cerute, nivelul de îmbunătățire al participanților cu deficiențe de vedere în a doua zi de training, respectiv în sesiunea de post-test a experimentului a fost în general, mai mare. De asemenea, procentul de subiecți care au înregistrat o îmbunătățire semnificativă ca urmare a etapei de antrenare este mai mare în grupul persoanelor cu deficiențe de vedere.

Rezultatele sesiunilor noastre de testare și de antrenare au dovedit că subiecții cu și fără deficiențe de vedere au fost capabili să utilizeze sunetele binaurale 3D sintetizate cu ajutorul HRTF-urilor neindividualizate ca singurul mijloc de navigare într-un mediu auditiv virtual. În plus, rezultatele sesiunii de post-test demonstrează că subiecții și-au consolidat abilitățile de orientare și și-au recalibrat rezoluția spațială în mediul auditiv virtual, pentru ambele tipuri de sunete [30], [31].

## CAPITOLUL 6

### JOCURI AUDIO, EXPERIMENTE ȘI REZULTATE

Acest capitol prezintă proiectarea a două jocuri audio și rezultatele a două proceduri experimentale realizate cu două grupuri de subiecți - cu și fără deficiențe de vedere. Detaliile de implementare, metodologia experimentală și rezultatele au fost publicate în [19], [44] și [45].

#### 6.1. EXPERIMENTE CU SUBIECTI CU VEDERE NORMALĂ

##### 6.1.1. Jocuri audio dezvoltate pentru realizarea experimentelor

Jocurile audio descrise în această secțiune au fost realizate în mediul de dezvoltare integrat Microsoft Visual Studio, folosind limbajul de programare C#. Scopul jocurilor constă în explorarea unui mediu virtual pe baza sunetelor binaurale 3D care ghidează jucătorul spre găsirea a 5 obiecte ascunse cât mai repede posibil. Jocurile se încheie atunci când al cincilea obiect este descoperit.

Jucătorii navighează liber prin mișcarea cursorului mouse-ului pentru a descoperi cele 5 obiecte invizibile, reprezentate de surse de sunet 3D. Prin apăsarea butonului din stânga al mouse-ului, jucătorii pot opri navigarea. Prin rotirea rotiței de derulare a mouse-ului, ei pot simula o schimbare în orientarea față de sursa de sunet. De exemplu, în cazul în care sursa de sunet este situată la 90 de grade la stânga, prin mișcarea în acea direcție, jucătorii pot percepe semnalul ca venind din față. Pentru a reporni navigarea, subiecții trebuie să apese butonul din dreapta al mouse-ului.

Pentru primul joc (Fig. 6.1.), punctul de plecare este centrul zonei de 500x500 pixeli. Poziția primei surse de sunet este selectată aleator într-un interval de 200 de pixeli în jurul punctului de plecare. Următoarele 4 obiective sunt poziționate în mod arbitrar în același interval de 200 de pixeli față de locația obiectului anterior. Doar o singură sursă de sunet poate fi percepută la un moment dat. Pe măsură ce jucătorul descoperă obiectele audio (sursele de sunet), acestea devin vizibile pe ecran, iar următorul obiect devine activ. Jocul se termină când au fost identificate locațiile tuturor celor 5 obiecte audio.

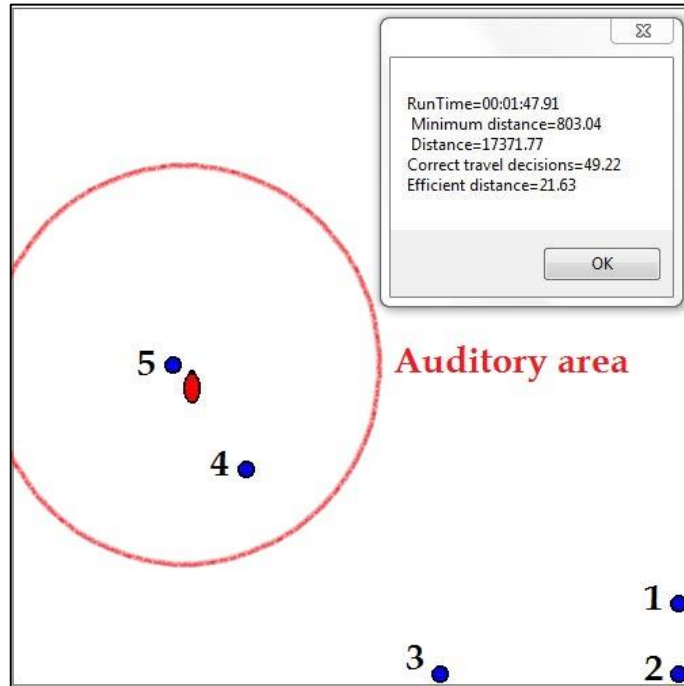


Fig. 6.1. Primul joc audio

În al doilea joc audio, zona de 600x600 pixeli a fost împărțită în 5 regiuni. Cele 3 regiuni superioare au o dimensiune de 200x300 pixeli, în timp ce cele 2 regiuni inferioare au o dimensiune de 300x300 pixeli (Fig. 6.2.). Astfel, cele 3 regiuni din zona de sus au o arie de căutare mai mică (cu un nivel mai scăzut de dificultate), iar cele două zone de jos au o arie de căutare mai mică (cu un nivel mai ridicat de dificultate) [19].

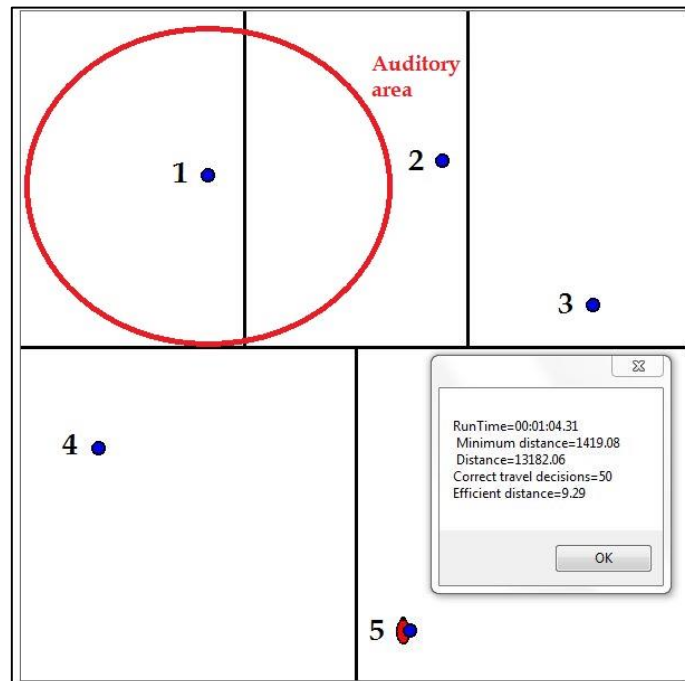


Fig. 6.2. Al doilea joc audio

### 6.1.2. Stimuli audio utilizați în experimente

Stimulii auditivi folosiți în jocuri sunt sunetele binaurale 3D (redate prin căști), care au fost sintetizate folosind limbajul de programare Csound pentru procesarea sunetului [36] (zgomot alb continuu, filtrat cu HRTF-urile neindividualizate din baza de date MIT [35]) și iconițe auditive care au fost folosite pentru a notifica jucătorii în următoarele situații: când opresc sau repornesc navigarea, descoperă o țintă, atunci când se apropie prea mult de marginile mediului virtual sau atunci când jocul s-a terminat. În ambele jocuri, sursele de sunet sunt poziționate la 0 grade altitudine în planul vertical.

### 6.1.3. Procedura experimentală

Am testat capacitatea de localizare a sunetului și reprezentarea spațială pentru 12 subiecți cu deficiențe de vedere, care au fost familiarizați anterior cu percepția sunetelor binaurale 3D. Ei au participat la 2 experimente (primul experiment a folosit primul joc descris în 6.1.1., în timp ce al doilea experiment a utilizat jocul audio cu regiunile prestabilite), care au fost separate de un interval de timp de 7 zile. Ambele experimente a avut 2 sesiuni de test, în care subiecților li s-a cerut să finalizeze jocurile cât mai repede posibil și o sesiune de antrenament de 3 minute în care le-au fost prezentate diverse sunete 3D. Experimentele au avut loc în Ploiești, România, în mai-iunie 2014.

### 6.1.4. Rezultate

Pentru a analiza rezultatele ambelor experimente, am luat în considerare următorii parametri:

- P1: Raportul dintre lungimea totală a traseului parcurs de către jucător și distanța minimă dintre cele 5 obiecte. Pentru rezultate eficiente, acest raport ar trebui să fie cât mai mic posibil;

- P2: Procentul de decizii corecte de deplasare, calculate ca raportul dintre numărul de mișcări efectuate în sensul apropierii de obiectul ce trebuie descoperit și numărul total de mișcări în jurul lui atunci când sursa de sunet este activă;

- P3: Timpul total (în secunde) necesar pentru a termina jocul.

### 6.1.5. Discuție

În cazul ambelor experimente, participanții au fost capabili să utilizeze cu succes indicatorii auditivi 3D pentru a mapa mediul virtual și a efectua sarcini simple de explorare. Procesul de navigare s-a bazat atât pe sunetele 3D care au transmis informații spațiale în ceea ce privește direcția și poziția obiectelor în spațiu, dar, de asemenea, și pe percepția schimbărilor continue în intensitatea sunetului, care codifică distanța dintre poziția virtuală a ascultătorului și sursa de sunet.

Rezultatele acestui studiu demonstrează că sunetele binaurale 3D și codificarea invers proporțională a distanței pot fi folosite în mod eficient pentru a naviga într-un mediu auditiv virtual. În plus, modificările continue în caracteristicile fizice ale sunetului pot transmite informații relevante pentru percepția ascultătorului. În afară de aceasta, chiar și o scurtă perioadă de antrenare (după cum am arătat în experimentele noastre), îi poate ajuta pe jucători să obțină rezultate mai bune [19].

## **6.2. ÎMBUNĂTĂȚIREA PERFORMANȚELOR DE JOC ALE NEVĂZĂTORILOR PRIN ANTRENARE BAZATĂ PE FEEDBACK MULTIMODAL**

Scopul acestui studiu este de a investiga gradul de îmbunătățire al abilităților de localizare a sunetelor în cadrul unui joc de navigare, ca efect al antrenamentului multimodal (auditiv și haptic). Rezultatele experimentului demonstrează o adaptare rapidă a subiecților la percepția sunetelor 3D sintetizate cu HRTF-uri neindividualizate și o capacitate de localizare a sunetelor sporită, ca urmare a efectelor strategiei de antrenare. Aceste îmbunătățiri sunt reflectate în performanțele superioare înregistrate în sesiunea de post-test a experimentului.

### **6.2.1. Stimuli audio utilizați în experiment**

Stimulii auditivi au fost sunetele binaurale 3D continue, sintetizate cu HRTF-urile neindividualizate din setul de date MIT [35], iconițele auditive (sunete care creează o analogie cu situațiile și evenimentele din lumea reală) și earcons (sunete abstracte, simbolice, folosite pentru a facilita navigarea jucătorilor în mediul virtual). Toate sunetele au fost sintetizate folosind limbajul de programare Csound [36].

Obiectele țintă au fost codificate cu ajutorul combinației de zgomot alb și roz în proporții variabile, în funcție de direcția sursei de sunet în spațiu (metodă descrisă în 5.2.).

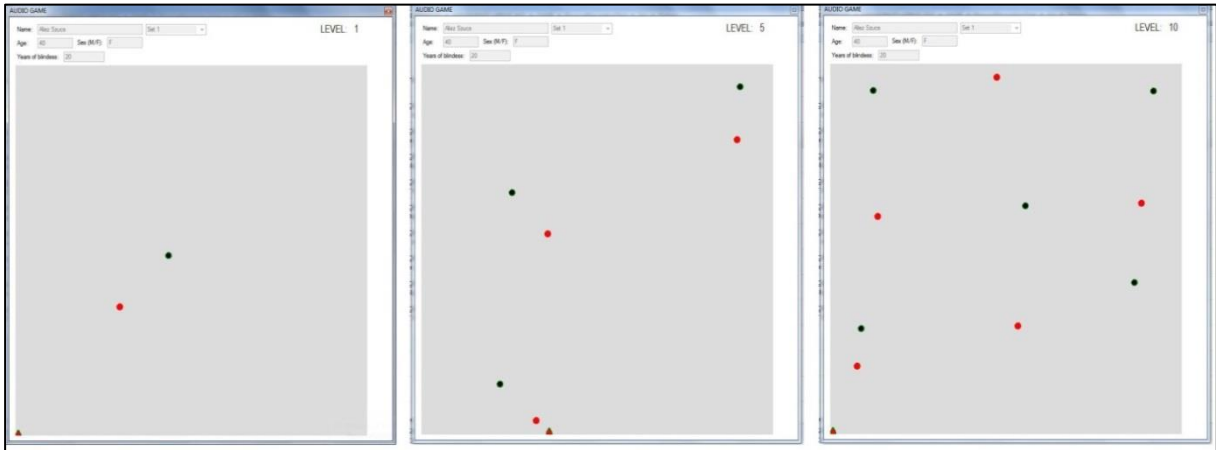
Locațiile obstacolelor au fost codificate printr-un sunet de tip alarmă, astfel că jucătorii au putut identifica atât direcția obiectelor, cât și a obstacolelor. Iconițele auditive utilizate au fost un sunet de alarmă, cu scopul de a spori atenția jucătorului în ceea ce privește prezența obstacolelor și sunetul unei coliziuni, atunci când jucătorul lovește un obstacol. Earcon-urile au fost reprezentate de sunetul unui click, atunci când jucătorul reușește să identifice poziția sursei țintă și un clopoțel, care anunță sfârșitul jocului. Pe măsură ce jucătorul se apropie de o țintă sau de un obstacol, intensitatea sunetului crește și, pe de altă parte, pe măsură ce se îndepartează, amplitudinea percepută scade.

### **6.2.2. Aplicații dezvoltate pentru experiment**

Aplicațiile descrise în această secțiune au fost dezvoltate în C#, folosind mediul Microsoft Visual Studio și utilizează stimulii audio prezentați în subcapitolul 6.2.1.

## **JOCUL AUDIO**

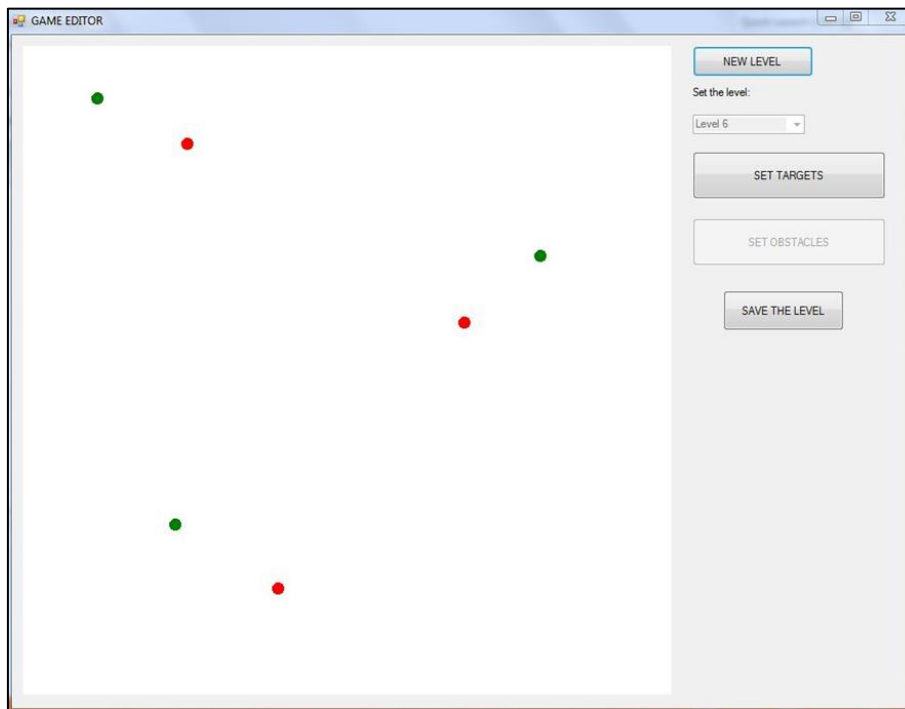
În jocul audio, ascultătorilor li s-a cerut să identifice locația mai multor surse de sunet ascunse, în timp ce încearcă să evite o serie de obstacole (Fig. 6.3.). Jocul a avut 10 niveluri de dificultate, proiectate în spațiul 2D, cu un număr variabil de obiecte țintă și obstacole.



**Fig. 6.3.** Design-ul nivelurilor 1, 5 și 10 din setul 1 de niveluri ale jocului

### EDITORUL DE JOC

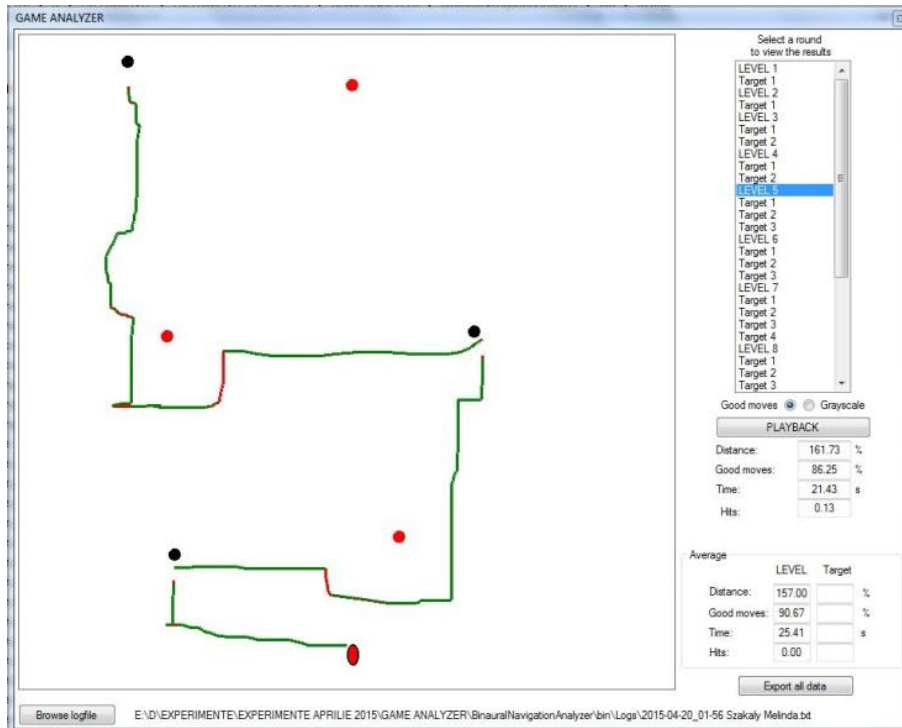
Cercetătorul poate proiecta jocul (distribuirea obiectelor țintă și a obstacolelor) într-o manieră bine definită și interactivă. Astfel, el trebuie să introducă numărul nivelului și apoi poate plasa obiectele (sursele de sunet) și obstacolele în joc (Fig. 6.4.).



**Fig. 6.4.** Editorul de joc

## APLICAȚIA GAME ANALYZER

Instrumentul Game Analyzer (Fig.6.5.) permite vizualizarea în timp real și redarea audio a performanțelor utilizatorilor pentru fiecare rundă și nivel în parte.



**Fig. 6.5.** Aplicația Game Analyzer

Fig. 6.5. prezintă performanțele jucătorului pentru nivelul 5 (care are 3 obiecte țintă și 3 obstacole), folosind opțiunea de vizualizare "Good moves".

Prin apăsarea butonului "Browse log file", cercetătorul poate încărca fișierul log care a fost creat și actualizat în timpul sesiunii de joc, ce stochează toate datele privind performanțele utilizatorului. Cercetătorul poate selecta runda sau nivelul dorit din lista situată în partea dreaptă a interfeței.

### 6.2.3. Experimentul de localizare a sunetului

Acest studiu cuprinde evaluarea abilităților de localizare a sunetelor a 10 subiecți cu deficiențe de vedere, care au jucat jocul audio cu niveluri ierarhice de dificultate descris în 6.2.2. În cadrul jocului, subiecții au trebuit să identifice locația mai multor surse de sunet ascunse, în timp ce încercau să evite o serie de obstacole. Experimentul a fost compus dintr-o sesiune de pre-test (în care subiecții au fost rugați să joace acest joc de două ori, pentru două seturi diferite de niveluri), o sesiune de antrenament (menită să-i ajute să se adapteze la percepția sunetelor 3D prin feedback perceptual multimodal – auditiv și haptic, folosind centura haptică prezentată în 5.1.2, cu singura diferență că în acest caz s-au folosit 24 de motoare cu vibrații, plasate la 15 grade diferență în jurul capului subiectului) și o sesiune de post-test (similară ca structură și dificultate cu cea de pre-test), în care a fost evaluat gradul de îmbunătățire al capacității de localizare a sunetelor obținut în urma sesiunii de antrenament. Experimentul a avut loc în luna aprilie 2015, în Győr, Ungaria [44].

### GRUPUL ȚINTĂ

10 persoane cu deficiențe de vedere (5 femei și 5 bărbați, care locuiesc în Győr, Ungaria, în vârstă de 27 – 63 ani, vârsta medie = 43 ani, cu un procent de acuitate vizuală variind între 0% și 15%. Doi dintre subiecți erau nevăzători din naștere, unul avea deficiențe de vedere congenitale - cu un procent de acuitate vizuală de 10%, în timp ce ceilalți aveau un debut tardiv al deficiențelor de vedere) au luat parte la experiment. Anterior începerii testelor, subiecții au fost informați cu privire la scopul experimentului și și-au dat acordul scris de participare.

### SESIUNILE DE PRE-TEST ȘI DE POST-TEST ALE EXPERIMENTULUI

În timpul sesiunii de pre-test, subiecții au jucat jocul de două ori, cu două seturi diferite de niveluri (setul 1 și setul 2). Înainte de sesiunea de pre-test, subiecților le-a fost prezentat scopul jocului și sunetele utilizate în strategia de sonificare.

Parametrii studiați au fost:

- P1: Raportul dintre distanța parcursă de către jucător (de la poziția de pornire până când descoperă locația obiectului curent) și distanța minimă posibilă (distanța euclidiană dintre punctul de pornire și poziția obiectului actual). Pentru prima sursă de sunet a oricărui nivel, poziția de pornire a fost în centrul ferestrei de joc. Pentru celelalte obiecte, poziția de plecare a fost locația sursei identificate anterior;
- P2: Procentul de decizii de navigare corecte, definite ca mișcări efectuate către sursa de sunet (minimizând distanța dintre locația virtuală a utilizatorului și poziția țintă);
- P3: Timpul mediu de finalizare per nivel (în secunde);
- P4: Numărul mediu de coliziuni cu obstacolele.

Sesiunea de post-test, care a avut loc la o zi după cea de antrenament, a fost efectuată în exact aceleași condiții ca și sesiunea de pre-test, cu ajutorul jocului audio. Scopul sesiunii de post-test a fost de a evalua capacitatea de localizare a sunetului și gradul de îmbunătățire al abilităților de navigare ca urmare a etapei de antrenament [44].

### SESIUNEA DE ANTRENAMENT A EXPERIMENTULUI

În timpul sesiunii de antrenament, subiecților cu deficiențe de vedere le-a fost oferit feedback haptic în ceea ce privește direcția sursei de sunet în spațiu. Astfel, ei au trebuit să poarte căști stereofonice și bentița haptică descrisă în 5.1.2., ce a conținut un număr de 24 de motoare cu vibrații (plasate la 15 de grade diferență în jurul capului) – ele au transmis vibrații corespunzătoare direcției sursei de sunet în spațiu.

Sesiunea de antrenament a avut loc în două zile consecutive. În fiecare dintre cele două zile, subiecții au realizat trei blocuri de antrenament. Fiecare bloc a avut o durată de 3 minute, în care utilizatorilor li s-a cerut să asculte o serie de 24 de sunete 3D (redate în sensul acelor de ceasornic de la 0 la 345 de grade) și apoi o serie de stimuli auditivi generați aleator, cu o durată de 4 secunde. Sunetele utilizate au fost combinația de zgomot alb și roz în proporții variabile - aceeași codificare utilizată pentru jocul descris în secțiunea anterioară. Fiecare stimul sonor perceput prin căști a fost însoțit de o serie de 4 vibrații resimțite pe bentița haptică (o vibrație pe secundă) care corespund direcției sursei de sunet în spațiu. Scopul sesiunii de antrenare a fost de a-i ajuta subiecții cu deficiențe de vedere să se obișnuiască cu percepția sunetelor 3D și să creeze o asociere multimodală eficientă (haptică și auditivă), care le-ar permite să identifice cu ușurință direcția sunetelor 3D. Rezoluția mare a bentiței hactice



(unde motoarele cu vibrații au fost amplasate la 15 de grade diferență în jurul capului subiectului) a permis o antrenare mai eficientă. (Fig. 6.6.) [44].



**Fig. 6.6.** Subiect cu deficiențe de vedere în timpul sesiunii de antrenament

### 6.2.4. Rezultate

Rezultatele experimentului nostru au demonstrat faptul că persoanele cu deficiențe de vedere au reușit să obțină o îmbunătățire rapidă a abilităților de localizare a sunetului și a capacității de navigare bazate pe percepția sunetelor. Aceste îmbunătățiri sunt rezultatul antrenamentului multimodal (auditiv și tactil), care a relevat faptul că învățarea joacă un rol important în recalibrarea rezoluției spațial-auditive a persoanelor cu deficiențe de vedere. Procedura de antrenare i-a ajutat pe subiecți să se adapteze la percepția sunetelor binaurale 3D sintetizate cu HRTF-uri neindividualizate în mediul virtual auditiv. Mai mult decât atât, antrenarea perceptuală le-a permis acestora să realizeze sarcini simple - de navigare, de localizare a surselor de sunet, de evitare a obstacolelor și de orientare spațială.

Subiecții și-au bazat strategia de joc pe percepția sunetelor binaurale direcționale, care au oferit indicii clare cu privire la poziția obiectelor și obstacolelor în spațiu, dar și pe percepția schimbărilor continue în intensitatea sunetului. Îmbunătățirile obținute în sesiunea de post-test a experimentului demonstrează faptul că participanții cu deficiențe de vedere au reușit să transforme indicatorii auditivi într-o reprezentare mentală solidă a mediului. În plus, ca urmare a recalibrării rapide a percepției sunetelor 3D, considerăm că și alte abilități cognitive, cum ar fi atenția și concentrarea au fost recrutate. Atenția și concentrarea au fost extrem de necesare pentru asocierea indiciile auditive și haptice primite de către subiecți în timpul sesiunii de antrenament.

Îmbunătățirea preciziei de localizare a sunetului se datorează metodei de antrenare perceptuale ce utilizează zgomotele cu o frecvență de bandă mai largă, ce conțin mai multe indicii spectrale pentru procesul de învățare/localizare. Chiar dacă acești stimuli nu sunt naturali, ei sunt eficienți pentru procesul de antrenare, datorită caracteristicilor lor de externalizare îmbunătățite. Un alt argument care susține eficiența sesiunii de antrenare este acela că subiecții au fost antrenați numai pentru 24 de poziții ale sursei de sunet, în timp ce s-au înregistrat reduceri ale erorii de percepție spațială pentru mult mai multe alte direcții, inclusiv pentru pozițiile neantrenate. Acest fapt demonstrează că într-adevăr s-a produs o recalibrare spațială, nu numai un proces de învățare conștientă a caracteristicilor spectro-temporale ale sunetului. În afară de aceasta, unul dintre rezultatele cele mai remarcabile raportate în studiul nostru este reprezentat de efectele pe termen lung ale sesiunilor de formare efectuate în experimentul anterior. Astfel, rezultatele sesiunii de pre-test ale experimentului curent sunt mai bune decât cele înregistrate în faza de post-test ale celui anterior, demonstrând că maparea spațial-auditivă este un proces continuu, în conformitate cu teoria lui Hofman [14].

Pe scurt, raportul dintre distanța totală parcursă de ascultători și distanța minimă posibilă a scăzut cu 27%, rata de decizii corecte de navigare efectuate în scopul identificării poziției sursei de sunet s-a îmbunătățit cu aproximativ 7%, timpul mediu de finalizare al unui nivel s-a redus cu 33%, în timp ce numărul de coliziuni ale obstacolelor a scăzut la jumătate în sesiunea de post-test a experimentului.

Cum rezultatele obținute atât în sesiunea de pre-test, cât și în cea de post-test ale experimentului actual sunt mai bune decât cele obținute în experimentul anterior, am demonstrat că sistemul auditiv al persoanelor cu deficiențe de vedere este capabil de a-și îmbunătăți continuu abilitățile de localizare a sunetului și că experiența de învățare joacă un rol fundamental în dobândirea de competențe cognitive și spațiale [44].

### 6.2.5. Concluzii

Rezultatele experimentale ale acestei cercetări au demonstrat că persoanele cu deficiențe de vedere sunt capabile să efectueze sarcini simple de navigare (cum ar fi căutarea de surse de sunet direcționale sau evitarea obstacolelor) în medii virtuale, folosind sunetele binaurale 3D ca unic mijloc de orientare. De asemenea, scurta sesiune de antrenament multimodal (auditiv și haptic) i-a ajutat pe subiecți să se adapteze la condițiile auditive modificate (cum ar fi utilizarea sunetelor 3D filtrate cu HRTF-uri neindividualizate), prin crearea unei asocieri solide între stimulii auditivi percepuți în căști și vibrațiile corespunzătoare direcției sursei de sunet de pe centura haptică. Subiecții și-au îmbunătățit rezoluția spațial-auditivă, abilitățile de navigare, orientare și mobilitate și capacitatea de luare a deciziilor. Totodată, au reușit să construiască o reprezentare spațială solidă a mediului virtual, care a condus la îmbunătățiri semnificative ale performanței de joc.

Astfel, putem concluziona că jocul prezentat în acest capitol este un instrument de reabilitare util pentru îmbunătățirea abilităților de navigare ale nevăzătorilor în mediul virtual, înainte de a utiliza un dispozitiv de substituție senzorială care ar oferi o reprezentare completă a mediului (ca cel pe care intenționăm să îl dezvoltăm [131]), în condiții reale. În plus, jocurile audio nu se adresează doar comunității nevăzătorilor, de aceea considerăm că acest joc poate fi jucat și de către persoanele fără probleme de vedere, care vor să încerce o alternativă la jocurile video, să se distreze și să-și antreneze abilitățile de localizare a sunetului în același timp [ 44], [45].

## 7. CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Experimentele prezentate în această lucrare au fost realizate în Ploiești, România (cele cu subiecții cu vedere normală) și în Győr, Ungaria (cele cu subiecții cu deficiențe de vedere).

### 7.1. CONTRIBUȚIILE ORIGINALE ALE ACESTEI TEZE

#### 1. Contribuții la studiul localizării sunetelor binaurale 3D

Aceste contribuții constau în dezvoltarea unei strategii experimentale (o sesiune de pre-test, una de antrenare bazată pe feedback perceptual multimodal și una de post-test), care folosește două tipuri diferite de stimuli: sunetul “ding” și combinația de zgomot alb și roz în proporții variabile, în funcție de direcția sursei de sunet în spațiu.

Scopul acestei cercetări a fost de a investiga gradul de adaptare la percepția sunetelor 3D sintetizate cu ajutorul HRTF-urilor neindividualizate ca urmare a etapei de antrenare, gradul de îmbunătățire a capacității de localizare a sunetului și de reducere a confuziilor față-spate pentru aceste două tipuri de sunete care prezintă un mare potențial de a fi utilizate în aplicații virtuale, jocuri audio, dispozitive asistive sau sisteme audio. De exemplu, sunetele cu o bandă de frecvență redusă pot fi folosite ca iconițe auditive (pentru a furniza informații direcționale în jocurile audio), emoticoanele auditive sau musicon-urile, pentru a simboliza evenimente, conceptualiza date și pentru a crește nivelul de imersiune în mediile auditive virtuale. Pe de altă parte, zgomotele pot fi integrate în tehnica de sonificare folosită pentru codificarea informațiilor direcționale în dispozitivele de substituție senzorială.

Rezultatele acestui studiu au fost publicate în Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, 2014 [19], Proceedings of the International Conferences on Auditory Display, Graz, Austria, 2015 [28], [29], Proceedings of the Interfaces and Human Computer Interaction Conference, Gran Canaria, Spania, 2015 [32], jurnalul Archives of Acoustics (2 lucrări, în prezent în proces de recenzare [30], [31]) și în jurnalul Journal of Visual Impairment & Blindness [44] (în prezent în proces de recenzare).

#### 2. Dezvoltarea de aplicații software pentru realizarea experimentelor de localizare a sunetelor binaurale 3D

O altă contribuție este reprezentată de dezvoltarea aplicației Binaural Navigation Test (descrisă anterior în 5.3.1.) și a aplicațiilor utilizate în timpul sesiunii de antrenare, prezentate în 5.3.2. și 5.3.3. (aplicația Visual-Auditory Perceptual Training Application și Haptic-Auditory Feedback Training). De asemenea, pentru a analiza rezultatele sesiunilor de pre-test și post-test am dezvoltat aplicația Binaural Navigation Analyzer, descrisă în 5.4.

#### 3. Experimentele de antrenare bazate pe feedback perceptual multimodal

Aceste experimente s-au desfășurat în Ploiești, România (cu 9 subiecți cu vedere normală) și în Győr, Ungaria (cu 9 subiecți cu deficiențe de vedere). Aplicațiile folosite în aceste experimente au fost Binaural Navigation Test (în sesiunile de pre-test și de post-test), aplicația Visual-Auditory Perceptual Training (utilizată în sesiunea de training a experimentului cu subiecții cu vedere normală), aplicația Haptic-Auditory Feedback Training (utilizată în etapa de training a experimentului cu subiecții cu deficiențe de vedere) și Binaural Navigation Analyzer, folosită pentru a evalua performanțele subiecților în etapa de pre-test și de post-test a experimentelor.

Aceste experimente au demonstrat că sistemul auditiv uman este capabil să se adapteze rapid la condițiile de redare audio modificate, cum ar fi ascultarea de sunete binaurale 3D filtrate cu HRTF-uri neindividualizate. Procesul de adaptare a fost rezultatul unei asocieri perceptuale intermodale între simțurile auditiv și vizual (în ceea ce privește subiecții fără probleme de vedere) sau tactil și auditiv, în cazul participanților cu deficiențe de vedere). Ambele grupuri de subiecți a reușit să își îmbunătățească performanțele de localizare a sunetului prin reducerea erorilor de localizare și a confuziilor față-spate pentru ambele tipuri de stimuli (cu rezultate semnificativ mai bune pentru rundele care utilizează sinteza de zgomot alb și roz în proporții variabile, în funcție la direcția sursei de sunet în spațiu). Deși subiecții fără probleme de vedere i-au depășit pe cei cu deficiențe de vedere în cele mai multe dintre sarcinile cerute, nivelul de îmbunătățire al participanților cu deficiențe de vedere în a doua zi de training, respectiv în sesiunea de post-test a experimentului a fost în general mai mare. De asemenea, procentul de subiecți care au înregistrat o îmbunătățire semnificativă ca urmare a etapei de antrenare este mai mare în grupul indivizilor cu deficiențe de vedere.

Rezultatele acestui studiu au fost publicate în *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing*, Sinaia, Romania, 2014 [19], *Proceedings of the International Conferences on Auditory Display*, Graz, Austria, 2015 [28], [29], *Proceedings of the Interfaces and Human Computer Interaction Conference*, Gran Canaria, Spania, 2015 [32], jurnalul *Archives of Acoustics* (2 lucrări, în prezent în proces de recenzare [30], [31]) și în jurnalul *Journal of Visual Impairment & Blindness* [44] (în prezent în proces de recenzare).

**4. Metoda de antrenare multimodală (auditivă și haptică)**, care folosește bentița haptică descrisă în 5.1.2. pentru a transmite informații perceptuale în ceea ce privește direcția sursei de sunet în spațiu. Această strategie de antrenare a permis subiecților cu deficiențe de vedere să-și îmbunătățească capacitatea de localizare a sunetului (s-au înregistrat erori de precizie mai mici și mai puține confuzii față-spate), aptitudinile și abilitățile de navigare.

S-a observat că antrenarea joacă un rol fundamental în procesul de adaptare auditivă și că aceasta este posibilă prin recalibrarea spațială bazată pe asocieri senzoriale multimodale. Metoda propusă va fi utilizată pentru a antrena rezoluția spațial-auditivă a utilizatorilor unui dispozitiv asistiv care își propune să ofere o reprezentare bogată a mediului prin sunete binaurale 3D.

### **5. Jocurile audio descrise în capitolul 6**

Jocurile audio descrise în capitolul 6 folosesc sunete 3D, iconițe auditive și earcon-uri pentru a îmbunătăți interacțiunea cu utilizatorul. Aplicația Game Editor asigură proiectarea de noi nivele ale jocului, în timp ce aplicația Binaural Game Analyzer oferă informații statistice și permite vizualizarea în timp real a performanțelor jucătorului.

### **6. Metoda de antrenament multimodal pentru îmbunătățirea performanțelor de joc ale subiecților cu deficiențe de vedere**

Acest experiment a fost realizat în Győr, Ungaria, cu 10 de persoane cu deficiențe de vedere (dintre care 2 erau nevăzători). Instrumentele utilizate pentru etapa de antrenare au fost jocul audio descris în 6.2., aplicația Game Editor, aplicația Game Analyzer și centura haptică prezentată în 5.1.2., cu diferența că toate cele 24 de motoare cu vibrații au fost plasate pe bentiță, la 15 de grade diferență în jurul capului ascultătorului.

**7. Combinația de zgomot alb și roz în proporții variabile, în funcție de direcția sursei de sunet în spațiu,** i-a ajutat pe subiecți să-și îmbunătățească capacitatea de localizare a sunetelor, fapt reflectat într-o eroare de localizare mai mică și un număr redus al confuziilor față-spate. Rezultatele experimentului nostru sunt mai bune decât cele obținute de Blum et al [16], Parseihian & Katz [40], Zahorik [41], Wenzel [42] și Padersen & Jorgensen [43].

În concluzie, abordarea propusă de noi poate fi considerată o metodă de antrenare utilă și un instrument de reabilitare eficient pentru proiectarea și utilizarea unui dispozitiv asistiv pentru persoanele nevăzătoare și pentru dezvoltarea viitoare a jocurilor audio.

## **7.2. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE**

Direcțiile viitoare de cercetare urmăresc dezvoltarea de jocuri audio de navigare pentru persoanele cu deficiențe de vedere, pe platforme mobile, utilizând biblioteca Csound pentru Android [47]. De asemenea, sunetele 3D vor integra informații direcționale în planul vertical. Aceste jocuri vor face parte din procedura de antrenare menită să îi ajute pe nevăzători să utilizeze dispozitivul asistiv care va fi dezvoltat în cadrul proiectului Sound of Vision [46].

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. World Health Organization Statistics. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>. Accesat în iunie 2015.
2. *T. Letowski, S. Letowski*, Localization Error: Accuracy and Precision of Auditory Localization (Chapter 4), *Advances in Sound Localization*, book edited by Pawel Strumillo, Intech, 2011.
3. *C.J. Plack*, *The Sense of Hearing*, Psychology Press, 2005.
4. *H. Wallach*, "The Role of Head Movements and Vestibular and Visual Cues in Sound Localization", *Journal of Experimental Psychology*, **vol. 27**, no. 4, 1940, pp. 339-368.
5. *J. Ahveninen, N. Kopčo, I.P. Jääskeläinen*, "Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans", *Hearing Research*, **vol. 307**, 2014, pp. 86-97.
6. *A. Kudo, H. Higuchi, H. Hokari, S. Shimada*, "Improved Method for Accurate Sound Localization", *Acoustical Science and Technology*, **vol. 27**, no. 3, 2006, pp. 134-146.
7. *The Synthetic Psychology of Sound Localization*. Available at: <http://gureckislab.org/courses/spring13/robots/SoundLocalization-2.html>. Accesat în iunie 2015.
8. *A. Meshram, R. Mehra, H. Yang, E. Dunn, J.M. Frahm, D. Manocha*, "P-HRTF: Efficient Personalized HRTF Computation for High-Fidelity Spatial Sound", *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Munich, Germany, 10-12 September 2014.
9. *M. Dellepiane, N. Pietroni, N. Tsingos, M. Asselot, R. Scopigno*, "Reconstructing Head Models from Photographs for Individualized 3D-audio Processing", *Comput. Graph. Forum*, **vol. 27**, no. 7, 2008, pp. 1719-1727.
10. *D.N. Zotkin, J. Hwang, R. Duraiswami, L.S. Davis*, "HRTF Personalization Using Anthropometric Measurements", *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'03)*, 2003, pp. 157-160.
11. *F. Wightman*, "Resolution of Front-Back Ambiguity in Spatial Hearing by Listener and Source Movement", *J. Acoust. Soc. Am.*, **vol. 105**, no. 5, 1999, pp. 2841-2853.
12. *D.L. Wang, G.J. Brown*, *Computational Auditory Scene Analysis: Principles, Algorithms, and Applications*, Wiley-IEEE Press, 2006
13. *O. Bălan, A. Moldoveanu, A. Butean, F. Moldoveanu, I. Negoii*, "Comparative Research on Sound Localization Accuracy in the Free-Field and Virtual Auditory Displays", *Proceedings of The 11th International Scientific Conference eLearning and software for Education*, Bucharest, April 23-24, 2015.
14. *P.M. Hofman, J.G. Van Riswick, A.J. Van Opstal*, "Relearning Sound Localization with New Ears", *Nat Neurosci*, **vol. 1**, no. 5, September 1998, pp. 417-421.
15. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, I. Negoii*, "The Role of Perceptual Feedback Training on Sound Localization Accuracy in Audio Experiments", *Proceedings of The 11th International Scientific Conference eLearning and software for Education*, Bucharest, April 23-24, 2015
16. *A. Blum, B.F.G. Katz, O. Warusfel*, "Eliciting Adaptation to Non-Individual HRTF Spectral Cues with Multi-Modal Training", *Proceedings of Joint Meeting of the German and the French Acoustical Societies (CFA/DAGA '04)*, Strasbourg, France. 2004. pp. 1225-1226.
17. *V. Tabry, R.J. Zatorre, P. Voss*, "The Influence of Vision on Sound Localization Abilities in Both the Horizontal and Vertical Planes", *Front Psychol.*, **vol. 4**, 932, 2013.
18. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu*, "Spatial Auditory Representation in the Case of the Visually Impaired People", *Journal of Information Systems & Operations Management*, **vol. 9**, no. 1, May 2015, pp. 1-11.

19. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, M. I. Dascălu, "Navigational 3D Audio-Based Game - Training Towards Rich Auditory Spatial Representation of the Environment", Proceedings of the 18th International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, October 17-19, 2014, pp. 688-693.
20. B. Röder, W. Teder-Sälejärvi, A. Sterr, F. Rösler, S.A. Hillyard, N.J. Neville, "Improved Auditory Spatial Tuning in Blind Humans", *Nature*, vol. 400(6740), July 1999, pp. 162-166.
21. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, "Navigational Audio Games: An Effective Approach Towards Improving Spatial Contextual Learning for Blind People", *The International Journal on Disability and Human Development*, vol. 14, no. 2, April 2015, pp. 109-118, ISSN (Online) 2191-0367, ISSN (Print) 2191-1231, DOI: 10.1515/ijdh-2014-0018
22. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, O.M. Ferche, "O Scurtă Clasificare a Jocurilor Audio în Contextul Îmbunătățirii Interacțiunii și Accesibilității pentru Persoanele Nevăzătoare", *Revista Română de Interacțiune Om-Calculator*, vol. 7, no. 3, 2014, pp. 225-238, ISSN 1843-4460
23. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, *ICT for Visually Impaired*, Printech, ISBN 978-606-23-0348-8, 2014.
24. J.R. Parker, J. Heerema, "Audio Interaction in Computer Mediated Games", *International Journal of Computer Games Technology*, vol. 2008, Article ID 178923.
25. N. Rober, M. Masuch, "Playing Audio-Only Games- A Compendium of Interactions with Virtual, Auditory Worlds", *Proceedings of DiGRA Conference*, 2005
26. J. Carvalho, T. Guerreiro, L. Duarte, L. Carrico, "Audio-Based Puzzle Gaming for Blind People", 2nd Workshop on Mobile Accessibility, 2012
27. T. Stockman, N. Rajgor, O. Metatla, L. Harrar, "The Design of Interactive Audio Soccer", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Interactive Sonification*, 2007
28. O. Bălan, A. Moldoveanu, H. Nagy, G. Wersényi, N. Botezatu, A. Stan, R. G. Lupu, "Haptic-Auditory Perceptual Feedback Based Training for Improving the Spatial Acoustic Resolution of the Visually Impaired People", *The 21st International Conference on Auditory Display (ICAD-2015)*, July 8-10, 2015, Graz, Austria
29. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, "3D Audio and Haptic Interfaces for Training the Spatial Acoustic Resolution in Virtual Auditory Environments", *The 21st International Conference on Auditory Display (ICAD-2015)*, July 8-10, 2015, Graz, Austria
30. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, "Perceptual Feedback Training for Improving Spatial Acuity and Resolving Front-Back Confusion Errors in Virtual Auditory Environments", *Archives of Acoustics* (in review)
31. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, "Comparative Analysis on How Multimodal Perceptual Feedback Training Improves the Spatial Auditory Performance of the Sighted and Visually Impaired People", *Archives of Acoustics* (in review)
32. O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, "Binaural Sound Analysis and Spatial Localization for the Visually Impaired People", 9th International Conference on Interfaces and Human Computer Interaction, 22 – 24 July 2015, Las Palmas de Gran Canaria, Spain
33. A. Stan, N. Botezatu, R.G. Lupu, "The Design of a Scalable Haptic System Used for Impaired People Assistance", *CSCS20: The 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*, 27-29 May 2015, Bucharest, Romania
34. Precision Microdrives, Eccentric Rotating Mass (ERM) Vibration. Available at: <http://www.precisionmicrodrives.com/application-notes-technical-guides/application-bulletins/ab-004-understanding-erm-characteristics-for-vibration-applications>. Accesat în iunie 2015.
35. MIT HRTF Database. Available at: <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>. Accesat în iunie 2015.
36. Csound manual. Available at: <http://floss.booktype.pro/csound/preface/>. Accesat în iunie 2015.
37. Visual Studio. Available at: <https://www.visualstudio.com/>. Accesat în august 2015.
38. The C# programming language. Available at: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/67ef8sbd.aspx>. Accesat în august 2015.

39. *P. Majdak, M.J. Goupell M, B. Laback*, “3-D Localization of Virtual Sound Sources: Effects of Visual Environment, Pointing Method, and Training”, *Atten Percept Psychophys*, **vol. 72**, no. 2, Feb 2010, pp. 454–469.
40. *G. Parsehian, B.F.G. Katz*, “Rapid Head-Related Transfer Function Adaptation Using a Virtual Auditory Environment”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **vol. 131**, 2012, pp. 2948-2957. doi: 10.1121/1.3687448.
41. *P. Zahorik, P. Bangayan, V. Sundareswaran, K. Wang, C. Tam*, “Perceptual Recalibration in Human Sound Localization: Learning to Remediate Front-Back Reversals”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **vol. 120**, 2006, pp. 343-359. doi: 10.1121/1.2208429
42. *E.M. Wenzel*, “Effect of Increasing System Latency on Localization of Virtual Sounds with Short and Long Duration”, *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*, Espoo, Finland, July 29-August 1, 2001, 185–190.
43. *J.A. Padersen, T. Jorgensen*, “Localization Performance of Real and Virtual Sound Sources”, *Proceedings North Atlantic Treaty Organization*, 2005
44. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, G. Wersényi*, Improving the Audio Game Playing Performances of the Visually Impaired People through Multimodal Training, *Journal of Visual Impairment & Blindness* (in review)
45. *O. Bălan, A. Moldoveanu, F. Moldoveanu, A. Butean*, “Developing a Navigational 3D Audio Game with Hierarchical Levels of Difficulty for the Visually Impaired Players”, a 12-a Conferință Națională de Interacțiune Om-Calculator, 24-25 September 2015, Bucharest, Romania
46. The Sound of Vision website. Available at: <http://www.soundofvision.net/>. Accesat în august 2015.
47. The Csound Library for Android. Available at: <http://sourceforge.net/projects/csound/files/csound5/Android/>. Accesat în august 2015.