
Izvorni znanstveni rad
Rukopis primljen 15. 12. 2014.
Prihvaćen za tisak 2. 3. 2015.

Ines Carović

icarovic@ffzg.hr

Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hrvatska

Stabilizacijski sustavi u ultrazvučnim istraživanjima

Sažetak

Ultrazvučna metoda se u posljednjih dvadeset godina sve više koristi u istraživanjima proizvodnje govora. Zbog prednosti koje ima u odnosu na druge metode (prikaz cijele linije jezika u realnom vremenu, neinvazivnost, biološka sigurnost, dostupnost i relativno niska cijena), ultrazvuk dominira kao slikovna metoda za istraživanja fiziologije govora. U ovome se radu daje pregled stabilizacijskih sustava u ultrazvučnim istraživanjima u posljednjih desetak godina te se predstavljaju stabilizacijski sustavi (S.O.S. i FILIP) osmišljeni za istraživanja u Laboratoriju za fiziološko istraživanje govora Odsjeka za fonetiku Filozofskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Rezultati dobiveni istraživanjem i verifikacijom daju informacije o stabilnosti sonde i ispitanika te o uspješnosti samih stabilizacijskih sustava. Maksimalni pomak sonde može se usporediti s rezultatima ostalih stabilizacijskih sustava.

Ključne riječi: ultrazvuk, stabilizacijski sustavi, S.O.S., FILIP, linija nepca

1. UVOD

Ultrazvuk je jedna od metoda za slikovno prikazivanje govornih organa čije su prednosti optimalan kontrast slike jezika za potrebe istraživanja proizvodnje govora, mogućnost različitih mjerenja gustoće pojedinih dijelova snimanoga objekta, mogućnost rekonstrukcije slike računalom nakon snimanja, trodimenzionalni prikaz, različite volumetrije, arhiviranje slika na magnetni ili optički disk, razmjena elektroničkih podataka i slično.

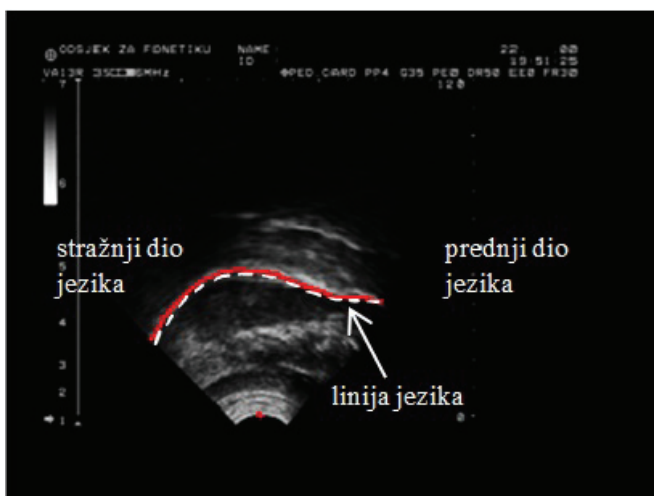
U istraživanjima proizvodnje govora ultrazvuk je sve zastupljenija metoda za proučavanje pokreta jezika. Trenutačno je najmanje invazivna, za zdravlje sigurna, brza, dostupna i relativno jeftina metoda za dobivanje artikulacijskih podataka jezika (Stone, 2005 a i b; Rahilly, 2013). Ultrazvukom se omogućava uzdužni (midsagitalni) i poprečni (koronalni) prikaz linije jezika, i to na način da se ona podudara s površinom jezika od koje se ultrazvučni valovi odbijaju. Jedna ili više slika obrisa jezika mogu poslužiti za vizualizaciju pokreta jezika, za usporedbu položaja jezika, za mjerenje promjena jezika od slike do slike, analizu trajanja i 3D rekonstrukcije.

Ultrazvuk je jedna od rijetkih metoda koje prikazuju pokrete jezika u realnom vremenu i nekim je računalnim programima omogućeno simultano snimanje ultrazvučnoga i zvučnoga (audio) signala (Rutter i Cunningham, 2013) te samim time i direktna usporedba linije jezika i akustičkih karakteristika govora.

Ultrazvučna sonda odašilje ultrazvučne impulse u tijelo, prima odbijene (echo) valove i stvara sliku u kojoj je jačina refleksije prikazana svjetlinom slike. Što je svjetlija slika neke anatomske strukture, to je jači ultrazvučni impuls reflektiran od te strukture. Slika površine jezika je moguća jer se ultrazvučni impuls odbija od promjene gustoće medija kroz koji prolazi (na granici jezik-zrak).

Na Slici 1 vidljiva je jasna bijela linija koja označava zrak neposredno iznad površine jezika od kojeg se ultrazvučni valovi odbijaju i vraćaju u sondu.

Uz brojne prednosti koje ultrazvučna metoda ima u odnosu na druge metode slikovnoga prikaza u istraživanjima artikulacijskih karakteristika govora, ima i nekih nedostataka koji se nastoje riješiti ili barem umanjiti.



Slika 1. Ultrazvučna slika linije jezika. Linija jezika je označena isprekidano, a vrh jezika je s desne strane.

Figure 1. Ultrasound image of tongue. Tongue spline is white line and tongue tip is on the right.

Jedan od izazova je kontrola položaja sonde u odnosu na glavu. Taj se izazov pokušava riješiti na različite načine, a jedan od njih je stabilizacijskim sustavima (Stone i Davis, 1995; Gick i sur., 2005; Mielke i sur., 2005; Scobbie i sur., 2008). U mnogim se istraživanjima koriste držači za glavu i sondu koji pomažu da se glava i sonda fiksiraju te omogućuju dulja ili ponovljiva ispitivanja istoga materijala bez promjene položaja jezika u odnosu na glavu. Kada se koristi lasersko (infracrveno) praćenje markera na sondi ili ispitaniku, može se kontrolirati i položaj sonde u odnosu na glavu. Drugi način stabilizacije sonde u odnosu na glavu može se postići primjenom posebnih stolica koje naslonom fiksiraju glavu, a fiksirana se sonda na nepomičnoj mehaničkoj ruci nalazi ispod brade. Različiti su eksperimenti pokazali da se ultrazvučna tehnologija može koristiti i na terenu, a ne samo u laboratorijskim uvjetima (Gick i sur., 2005). Takvi podaci ohrabruju istraživače i kliničare u pripremanju aplikacija za ispravljanje atipičnoga govora i za istraživanja spontanoga govora u nelaboratorijskim uvjetima. U nastavku će biti prikazani različiti stabilizacijski sustavi koji se trenutačno koriste u ultrazvučnim istraživanjima.

Drugi je izazov u istraživanjima govora što ultrazvuk, za razliku od npr. magnetske rezonancije, ne omogućava potpun prikaz svih govornih organa istodobno. Na snimkama se osim jezika ne vidi nijedna referentna točka pomoću

koje bi se mogli kvantificirati podaci o artikulacijskim karakteristikama, a jezična i čeljusna kost stvaraju sjenu tako da se ne mogu dobiti informacije o položaju jezika. Postoji nekoliko tehnika kojima se može detektirati jezik pritisnut na tvrdo nepce, a jedna od njih je snimanje položaja jezika prilikom gutanja. Jedno od rješenja može biti prije spomenuti sustav praćenja kamerom laserskih markera na ispitaniku ili sondi. Drugo je rješenje da mjesto na kojem je sonda pričvršćena za bradu koristimo kao referentnu točku (Gick, 2002). Vrh jezika i epiglotis često ne mogu biti prikazani na snimci jer se zbog zračnoga džepa stvara sjena na slici te na to treba paziti kada se proučavaju određeni dijelovi jezika. Vidljivosti vrha jezika može se doskočiti tako da se jezik spusti na samo dno usne šupljine ili da se usna šupljina ispuni tekućinom. Korištenje sonde sa širim kutom omogućava vidljivost većega dijela jezika, a i Gick (2002) napominje da je važno individualno namještanje sonde za svakoga ispitanika (tj. kuta pod kojim sonda stoji u odnosu na glavu).

Još jedan od izazova na koji su istraživači kod ultrazvuka naišli jest relativno malo uzorkovanje budući da ultrazvuk prenosi signal na zaslon s frekvencijom uzorkovanja videoizlaza. To uzorkovanje može varirati od 25 do 30 slika u sekundi i ovisi o sustavu koji koristi zemlja u kojoj se istraživanje provodi. Za većinu je američkih ultrazvuka ta frekvencija 30, dok je za europske 25 slika u sekundi. Ta je frekvencija prespora za one segmente u govoru za koje je i nekoliko milisekunda važno u određivanju trajanja artikulacijskoga pokreta. I za to postoje rješenja koja se napretkom tehnologije sve brže pronalaze i realiziraju (Wrench i Scobbie, 2012). Koristi se sustav izrazito brzog (engl. *high speed*) ultrazvučnoga signala i snimanje s namještanjem *cineloop* (digitalno snimanje više dijelova pojedinačne ultrazvučne slike, što omogućuje bolju rezoluciju) i dobiva se veće uzorkovanje što omogućava dvije ključne značajke koje se ne nalaze u drugim sustavima. Prva je da omogućuje korisniku da namješta softver na pojedinim značajkama i razinama rada. Druga je da omogućava sinkronizaciju impulsa za precizno mjerenje vremenskoga okvira s obzirom na akustički signal.

U ovome se radu daje pregled stabilizacijskih sustava u ultrazvučnim istraživanjima u posljednjih desetak godina te se predstavljaju stabilizacijski sustavi osmišljeni za istraživanja u Laboratoriju za fiziološko istraživanje govora Odsjeka za fonetiku. Rezultati dobiveni istraživanjem i verifikacijom daju informacije o stabilnosti sonde i ispitanika te o uspješnosti samih stabilizacijskih sustava. Maksimalni pomak sonde može se usporediti s rezultatima ostalih stabilizacijskih sustava.

1.1. Stabilizacijski sustavi za ultrazvučna istraživanja govora

Za promatranje unutrašnjih organa ultrazvukom nužno je osigurati tijesan dodir sonde i kože da bi se izbjegao zrak između ta dva dijela te da bi se omogućio prolaz ultrazvučnom signalu u tkivo. U dijagnostičkom se ultrazvuku koristi gel koji postaje most između sonde i tkiva. Budući da gel u većini istraživanja govora nekontrolirano pomiče sondu u svim smjerovima (jer smanjuje otpor sonde koju je u tom slučaju teže stabilizirati), nastoji ga se izbjeći, a tijesan kontakt sonde i kože pokušava se osigurati različitim načinima namještanja sonde (Stone i Davis, 1995; Stone, 2005a).

Dva su načina smještanja sonde ispod brade: u prvom se sonda fiksira, a u drugom je mobilna, nefiksirana. Kada je sonda imobilizirana (fiksirana) u odnosu na bradu i ne pomiče se zajedno s njom (npr. na stalku koji je nepomičan ispod brade), glava je referentna točka (a ne čeljust) pa bi nepce trebalo biti stabilna točka na koju se referira. Ako je istodobno i glava stabilna u odnosu na sondu (npr. čelo naslonjeno i stabilizirano na osloncu), sve informacije o jeziku su zapravo relativne mjere pomaka čeljust-jezik pa tvrdo nepce služi kao referentna točka (Stone, 2005a). Tada se pretpostavlja da je pomak čeljusti zapravo i pomak jezika jer je referentna točka slike (prikaza) imobilizirana u odnosu na glavu, tako da su pomaci napravljeni u odnosu na sondu ujedno relativni u odnosu na glavu (nepce). U tom slučaju pomaci jezika i čeljusti nisu odvojivi. Pomoću dodatnih metoda snimanja pomaka čeljusti (optotrak, EMMA ili videokamera) mogao bi se izdvojiti pomak jezika od pomaka čeljusti. Razlika pomaka jezika i čeljusti nastaje jer jezik i čeljust nisu udaljeni jednako na čitavoj duljini jezika (npr. prednji dio jezika više ovisi o otvoru čeljusti nego korijen) te je zahtjevnije dobiti istodobno točne podatke o točkama duž cijele linije jezika.

Druga mogućnost je nefiksiranje sonde pa se sonda miče gore-dolje kad i čeljust, koja je u ovome slučaju referentna točka, te se jezik miče relativno u odnosu na čeljust, a ne u odnosu na glavu. Jedan od izbora je ručno držanje sonde gdje postoji velika mogućnost pomicanja i rotacije sonde, no postoji i mogućnost stabilizacije sonde u odnosu na bradu pa je sonda pomična (pomiče se zajedno s donjom čeljusti), ali stabilna u odnosu na bradu. Stone (2005a) napominje da je čeljust kao referentna točka dosta nepouzdana. Međutim, ako je sonda stabilna u odnosu na bradu (donju čeljust), minimalizira se pogreška pomaka i rotacije same sonde koju bi trebalo korigirati, te se u programu za anotacije može odabrati bilo

koja točka kao referentna (ili točka emisije ultrazvučnoga signala) koja će dati vrlo pouzdane rezultate.

U istraživanjima govora ultrazvukom koristi se nekoliko sustava za stabilizaciju iz laboratorija za ultrazvučnu analizu pokreta govornih organa.

Head and Transducer Support System (HATS) (Stone i Davis, 1995) sa Sveučilišta u Marylandu stabilizira sondu u odnosu na bradu, ali i ispitanika i njegovu glavu. Ispitanik sjedi u zubarskoj stolici te ima tri potpore za glavu: na zatiljku, ispod brade i na čelu. Taj sustav je korišten i za rendgenska snimanja, a pomak je do dva centimetra.

The Haskins Optically Corrected Ultrasound System (HOCUS) (Whalen i sur., 2005) ne stabilizira glavu, no daje mogućnost korekcije izračuna ako ispitanik pomiče glavu jer mjeri relativan odnos položaja sonde i glave. Granica unutar koje se sonda smije pomicati vertikalno, horizontalno ili se rotirati je između dva i četiri milimetra, a u stupnjevima između pet i sedam stupnjeva.

Metodologija prijenosne stabilizacije glave (Gick, 2002; Gick i sur., 2005) korištena je u istraživanjima u Interdisciplinarnom laboratoriju za istraživanja govora na Odsjeku za lingvistiku Sveučilišta British Columbia u Kanadi i Haskins laboratoriju u Connecticutu. Ta je metoda predviđena za laboratorijska istraživanja, ali i za terenski rad. Složeni stabilizacijski sustavi zamjenjuju se fiksacijom glave uza zid ili naslon za glavu na stolici i ručnim držanjem sonde. Stabilnost sonde kontrolira sam ispitanik, a održava je pomoću lasera koji je pričvršćen na sondu i koji ispitanik treba držati unutar deset centimetara označenih na zidu.

Stabilizacija sonde držačem za mikrofonski japanskoga Sveučilišta Aizu i naslanjanje glave na zid (Horiguchi i Wilson, 2007) provjerava se snimanjem 12 laserskih izvora smještenih na zidu, naočalama, usnama, bradi, sondi te držaču za mikrofonski ili držaču za sondu.

Metoda stabilizacije glave i sonde sa Sveučilišta u Torontu (CHASE) (Carmichael, 2004; Bressmann, 2008) ima nekoliko fiksiranih točaka na ispitaniku: naslonjeno čelo, držači uz lice (za smanjenje pokreta lijevo-desno), držač oko cijele glave, fiksator ramena te držač sonde. Bressmann napominje da za kvalitativnu analizu nije nužna stabilizacija, ali da za kvantifikaciju treba osigurati fiksaciju glave, sonde i ramena kako bi se izbjegao pomak u bilo kojem smjeru.

Stabilizacijski sustav za glavu (QMUC Headset) Sveučilišta Queen Margaret iz Edinburgha i Articulate Instrumentsa (Scobbie i sur., 2008) osigurava nepomicanje

sonde u odnosu na glavu, a glava i ostatak tijela ostaju nefiksirani. Dopušten je pomak od pet milimetara (McLeod i Wrench, 2008).

U ultrazvučnim istraživanjima govora na Sveučilištu u Arizoni postoji sustav kontrole pokreta glave i sonde te njihove orijentacije (Mielke i sur., 2005). PALATRON nije stabilizacijski sustav, već tehnika kontrole pomaka. Ispitanik rukom drži sondu i ne pomiče glavu te nosi naočale koje imaju nastavak (usku šipku) s točkama. Pomicanje tih točaka prati kamera, a osim pokreta glave prati se i pomicanje sonde s istim nastavkom koji je neprestano u kadru i istodobno se snima ultrazvučnim videom. Razvoj te metode prati Palatoglossatron (Miller i Finch, 2011) koji ručno držanje sonde zamjenjuje polukacigom s držačem za sondu i neovisno o držaču fiksiranim naočalama sa šipkom s oznakama kao što je prije opisano. Na taj se način uspoređuju dva pomaka: pomak glave i pomak sonde, a dopušteno je pomicanje do dva milimetra.

U Tablici 1 prikazani su svi stabilizacijski sustavi u laboratorijima za ultrazvučno istraživanje govora i izmjereni (dopušteni) pomak sonde. Stabilizacijski sustavi mogu držati sondu fiksiranu s pomakom od najmanje dva milimetra, a najveći dopušteni pomak je deset centimetara s ručnim držanjem sonde i kontrolom snopa laserske zrake unutar kvadrata 10x10 centimetara.

Tablica 1. Usporedba stabilizacijskih sustava u laboratorijima za ultrazvučno istraživanje govora i izmjereni (dopušteni) pomak sonde

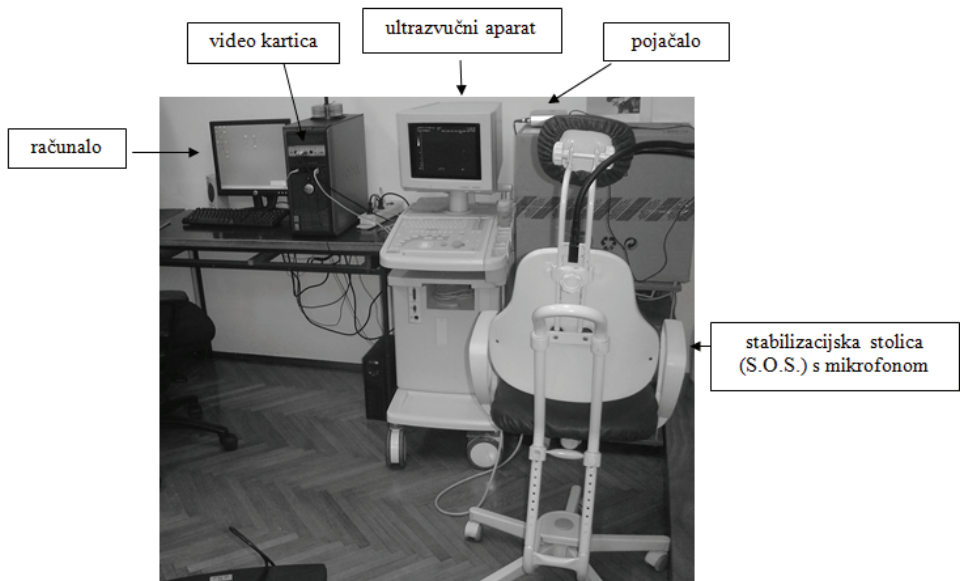
Table 1. Comparison of stabilization systems for ultrasound research of speech at different laboratories

STABILIZACIJSKI SUSTAV	POMAK SONDE
HATS i metoda TH	do 2 cm
NYU	7 mm
Stabilizacijski sustav za glavu (QMUC Headset)	5 mm
CHASE	3 mm
Metodologija prijenosne stabilizacije glave (UBC)	unutar 10 cm + korekcija
HOCUS	2 i 4 mm + korekcija
PALATRON (i Palatoglossatron)	2 mm + korekcija
Stabilizacija sonde držačem za mikrofon (Sveučilište Aizu)	korekcija
FILIP	?

Sve navedene metode stabilizacije imaju prilično visoku cijenu i bile su teško dostupne za ovo istraživanje te je u sklopu nastanka Hrvatskoga ultrazvučnoga korpusa (HULK, Carović, 2014) osmišljena posebna metoda stabilizacije. FILIP (Fonetski imobilizator za laboratorijsko istraživanje proizvodnje) omogućuje stabilizaciju sonde ispod brade tijekom cijeloga ispitivanja, a S.O.S. (Sustav osnovne stabilizacije) osigurava nepomicanje glave ispitanika. Stabilizacijski sustav omogućuje istraživaču namještanje sonde da bi se dobila optimalna kvaliteta ultrazvučne slike i zadržavanje položaja sonde koji je specifičan za svakoga ispitanika i za svaki promatrani događaj.

1.1.1. Ultrazvučni sustav koji je verificiran u ovom istraživanju

Za istraživanje je korišten ultrazvučni sustav Odsjeka za fonetiku Sveučilišta u Zagrebu (Slika 2) koji se sastoji od ultrazvučnoga aparata sa sondom, odvojenoga mikrofona i osobnoga računala te stabilizacijskoga sustava ispitanika (S.O.S.) i stabilizacijskoga sustava sonde (FILIP).



Slika 2. Ultrazvučni sustav Odsjeka za fonetiku Filozofskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Figure 2. Ultrasound system at the Department of Phonetics, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Zagreb

Slika 2 prikazuje ultrazvučni aparat korišten u istraživanju proizvođača Shimadzu, model SDU-450XL (220V-P CE) namijenjen za europsko tržište sa standardnim PAL videoformatom. Na njega je spojena konveksna sonda, model VA13R-050U s karakteristikama raspona frekvencija od 3,5 do 6 MHz uz mogućnost odabira (osim krajnjih) i središnje frekvencije 5 MHz, a mikrofon Sony ECM-MS907 spojen je odvojeno na videokarticu. Za snimanje je odabrana frekvencija 6 MHz i dubina signala 12 centimetara jer se u predeksperimentu i prvom susretu ispitanika s ultrazvukom radi testiranja vidljivosti linije jezika na zaslonu ultrazvučnoga aparata pokazalo da su to optimalne postavke za dobru vidljivost linije jezika za većinu ispitanika.

Ultrazvučni se signal prenosi USB videokarticom Canopus u standardnom PAL formatu, a signal se pohranjuje na računalni tvrdi disk računala. Akustički se signal snima na mikrofon pričvršćen za stabilizacijsku stolicu simultano s videom u programu DV-Storm RT (Canopus, 2003).

1.1.2. Metoda stabilizacije

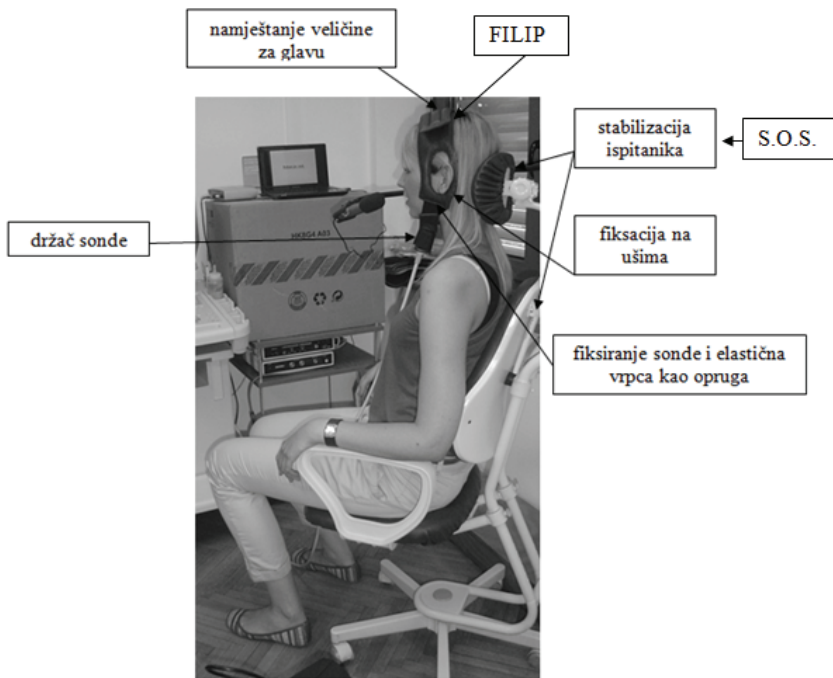
Jedan od važnih uvjeta u slikovnom prikazivanju jezika jest stabilizacija sonde i samoga ispitanika da bi se dobili usporedivi podaci tijekom cijeloga ispitivanja (Stone, 2005a).

Prije samoga istraživanja i dobivanja podataka ultrazvučnim snimanjem potrebno je osigurati metodu pričvršćivanja (stabilizacije i fiksiranosti) sonde ispod ispitanikove brade. Da bi sonda bila stabilizirana, treba osigurati da se ne pomiče naprijed-natrag i da se ne okreće oko svoje osi, a fiksacija znači da je sondu potrebno priljubiti uz bradu, tj. osigurati da se između sonde i kože izbjegne zrak koji zbog razlike u gustoći reflektira ultrazvučni signal u sondu. Sonda treba biti pričvršćena pod bradom tijekom cijeloga eksperimenta, usmjerena u jednom smjeru i fiksirana da bi dobivene slike jezika mogle prikazivati jezik iz istoga kuta te da bi mogle biti usporedive i kvantificirane (Gick, 2002).

Stabilizacija ispitanika treba zadovoljiti različite uvjete, s jedne strane sprječavanje pomicanja glave lijevo-desno i gore-dolje, a s druge strane prirodni položaj za govor (npr. nagib stolice) jer se pomicanjem ispitanika, tj. glave mijenja kut emitiranja ultrazvučnoga signala. Sustav bi trebao osigurati i udoban položaj ispitanika budući da snimanje može trajati i duže od jednoga sata.

Za ovo je istraživanje pripremljen posebno dizajniran sustav za stabilizaciju sonde i za potporu glave ispitanika, a zadovoljeni su gotovo svi zahtjevi navedeni u prethodnom odlomku. Ovakav sustav ne zadovoljava uvjet o sprječavanju pomaka glave ispitanika (npr. lijevo-desno), već omogućuje potporu za glavu, a pomak glave sprječava sam

ispitanik. Slika 3 prikazuje set za glavu nazvan FILIP (Fonetski imobilizator za laboratorijsko istraživanje proizvodnje, engl. PHILIP, *Phonetic Imobilizator for Laboratory Investigation of Production*) koji je prenosiv i pogodan i za terenska istraživanja, a čvrsto fiksira sondu u odnosu na bradu (donju čeljust). Napravljen je od meke kože punjene tankom spužvom da bi se ispitanicima osigurala udobnost. Na tjemenu je preklop koji se može namještati ovisno o veličini glave i spaja se jakom ljepljivom čičak-vrpcom. Istim mehanizmom zatvara se sonda u tobolac te se fiksira za držač i namješta tako da istraživač može namjestiti optimalan položaj za snimanje. Optimalan položaj je onaj kod kojega je dobro vidljiva neisprekidana sagitalna linija jezika na zaslonu ultrazvučnoga aparata. Kao pomoć ispitivaču u eksperimentu ispitanici su trebali izgovarati *ti ti ti* da bi ispitivač potvrdio da se vidi vrh jezika, *gu gu gu* da bi potvrdio vidljivost korijena jezika te *ba ba ba* da provjeri može li ispitanik primjereno otvarati donju čeljust.



Slika 3. FILIP (stabilizacija sonde unutar stabilizacijskoga sustava za glavu, Fonetski imobilizator za laboratorijsko istraživanje proizvodnje) i S.O.S. (Sustav osnovne stabilizacije)

Figure 3. PHILIP (Phonetic immobilizer for laboratory investigation of production) and S.O.S. (system of basic stabilization)

Na Slici 3 prikazan je i Sustav osnovne stabilizacije (S.O.S.), tj. stabilizacijska stolica koja ima pomični naslon za glavu (gore-dolje i naprijed-natrag) te utor za fiksirani položaj glave. Na stolici je pričvršćen i pomični stalak za mikrofon koji se namješta ispred ispitanikovih usta na udaljenost do deset centimetara te nasloni za ruke radi osiguravanja udobnosti.

2. MATERIJAL I METODA

2.1. Materijal

Iz snimljenoga ultrazvučnog korpusa HULK (Carović, 2014) izdvojene su i iscrtane linije nepca pri gutanju u osam jednako razmaknutih vremenskih odsječaka.

2.2. Ispitanici

Za ovo je istraživanje izabrano osam ispitanika (četiri muška i četiri ženska) u dobi od 26 do 36 godina (prosjek 31 godina sa standardnom devijacijom 4,28) s područja cijele Hrvatske, iz Buzeta, Čabra, Čakovca, Korčule, Križa, Petrinje, Virovitice i Zagreba. Ispitanici su dobili obrazac s informacijama o ultrazvuku, uputama o tijeku eksperimenta te se od njih tražio pisani pristanak na eksperiment.

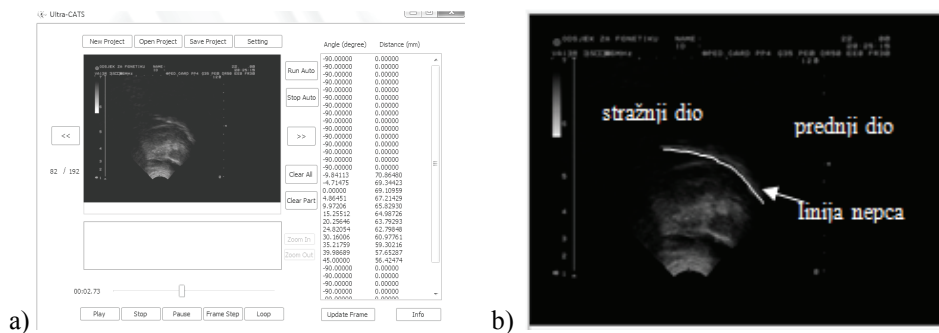
2.3. Postupak snimanja

Eksperiment je proveden u Laboratoriju za fiziološka istraživanja govora na Odsjeku za fonetiku. Prije samoga eksperimenta ispitanici su došli na testiranje vidljivosti linije jezika i na upoznavanje s ultrazvučnom metodom. Na eksperimentu su ispitanici smješteni u sustav osnovne stabilizacije s ultrazvučnom sondom ispod brade i mikrofonom ispred usta.

U dijelu eksperimenta s govornim materijalom (325 rečenica s beznačenskim riječima) ispitanici su trebali prije svake pedesete rečenice popiti vode na slamku (da bi se izbjeglo pomicanje glave pri naginjanju čaše) i tri puta progutati, a nakon trećega gutanja zadržati jezik na nepcu. Gutanjem se nesvjesno jezik priljubljuje uz nepce. Voda omogućava bolju vidljivost linije jezika jer ovlažuje površinu jezika te se može jasnije uočiti linija između različitih gustoća tkiva (jezik-nepce). Snimke su anotirane i iscrtane ručno u

programu Ultra-CATS. Odabran je računalni program Ultra-CATS napravljen na Odsjeku za patologiju govora i jezika Sveučilišta u Torontu koji poluautomatski analizira ultrazvučne podatke (Bressmann i sur., 2005; Bressmann, 2010) i koji je zadovoljio nekoliko kriterija u predeksperimentu: dostupan je, pristupačan (besplatan), ima zadovoljavajući prikaz i jednostavan je za uporabu i analizu.

Na Slici 4 vidljivi su prikazi linije nepca tako da je isti primjer ultrazvučne slike prikazan u programu u kojem su ultrazvučne snimke anotirane i iscrtane linije jezika (Slika 4a), a s druge je strane na Slici 4b prikazana iscrtana linija nepca, tj. linija granice različitih gustoća tkiva (jezik-nepce).



Slika 4. Prikaz linije nepca (granica između jezika i nepca). Vrh jezika je s desne strane. Slika a) ultrazvučna slika zadržanoga jezika na nepcu u programu Ultra-CATS, b) prikaz iscrtane linije nepca (granice između jezika i nepca).

Figure 4. Spline of palate. Tongue tip is on the right. Ultrasound image of spline between palate and tongue taken in Ultra-CATS (image a)), and tracking line of palate (image b)).

U ovome je radu korištena metoda dobivanja linije nepca gutanjem kako bi se istražila varijabilnost stabilizacijskih sustava FILIP i S.O.S. koji su napravljeni za potrebe ovoga istraživanja. Snimke gutanja za svakoga su ispitanika pregledane, a zbog složenosti procesa gutanja u istraživanju je traženo od ispitanika i da svjesno zadrže jezik na nepcu prilikom gutanja. Na taj su način dobivene dulje snimke zadržavanja jezika na nepcu, a ispitivač je nakon upute za gutanje na zaslonu ultrazvuka provjeravao vidljivost linije. Za istraživanje su iskorištene najviše linije u stabilnom položaju (nepromijenjenih nekoliko susjednih ultrazvučnih slika). Za sve

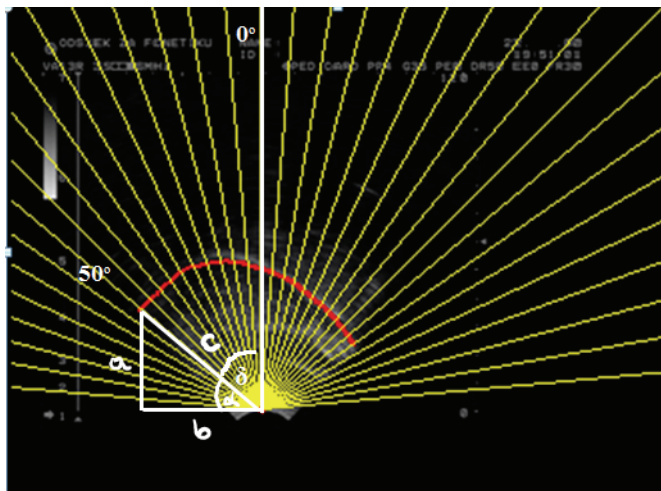
ispitanike nisu vidljive iste duljine nepca jer su iscrtane samo one neprijeporne koje su upotrijebljene za istraživanje. Prije samoga gutanja jezik je u neutralnom položaju te su za potrebe ovoga eksperimenta i provjeru vjerodostojnosti poslužile slike jezika u neutralnom položaju da bi se varijabilnost linija iscrtanoga nepca mogla usporediti s varijabilnošću i koeficijentom determinacije linija jezika u neutralnom položaju.

2.4. Postupak dobivanja i analize podataka

Iz podataka koji se u Ultra-CATS-u dobivaju tek iscrtavanjem linije (podaci su udaljenost linije koja siječe iscrtanu liniju od polazne točke polarnoga sustava) tekstualna datoteka se unosi u program Excel koji svakom retku pridjeljuje broj slike i vrijeme, a svaki stupac je jedna od linija polarnoga sustava od 170 stupnjeva. Program za anotaciju učitava nule na mjestima na kojima nema linije jezika (linije polarnoga sustava nemaju iscrtanu liniju koju bi sjekle), a u tekstualnoj ih datoteci ispisuje na isti način. U prikazima i izračunima sve stupce s nulama treba zanemariti jer ne daju informaciju o položaju jezika tj. u ovom slučaju nepca. Način pretvorbe podataka za polarni sustav u kartezijanski detaljnije je prikazan u prethodnom radu (Carović, 2014).

Svaku udaljenost sjecišta od referentne točke iz polarnoga prikaza u programu za iscrtavanje Ultra-CATS treba prikazati kao (x, y) točku u kartezijanskom sustavu kojoj je ordinata visina točke od imaginarne horizontalne linije koja je okomita na liniju na kojoj je referentna točka (na 0°), a apscisa podjednako razmaknute točke (po 5°) na omjernoj skali.

Na Slici 5 može se vidjeti pravokutni trokut kojemu je udaljenost početka iscrtavanja linije jezika (c) hipotenuza pravokutnoga trokuta, a kut (α) koji zatvara hipotenuzu i horizontalnu liniju razlika pravoga kuta i kuta na kojem je sjecište linije jezika (δ). Visinu je moguće izračunati pomoću trigonometrijskoga računa sinusa (1). Kut (α) treba dobiti razlikom pravoga kuta (90°) i apsolutne vrijednosti kuta (δ) od središnje linije (0°). Vrijednost kuta je poznata jer na toj vrijednosti linija jezika siječe liniju polarnoga prikaza.



Slika 5. Predložak s pravokutnim trokutom za izračun mjera polarnoga sustava u kartezijanski

Figure 5. Sketch with triangle with labels for calculating measures from polar to Cartesian coordinate system

Podaci koji omogućavaju usporediv prikaz linije nepca na ultrazvučnoj snimci i linije u grafu tabličnoga kalkulatora (Excel) dobivaju se izračunom pomoću formule 1.

$$(1) \quad a = c * \sin\left(\frac{\pi * (90 - \delta)}{180}\right)$$

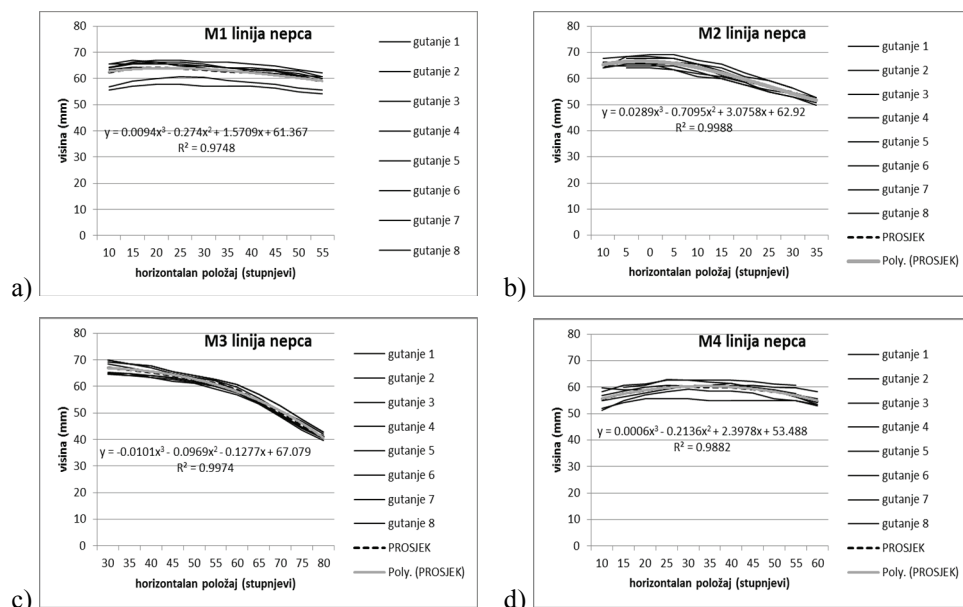
Linija nepca može se dobiti umetanjem linijskoga grafa označavanjem podataka koji nisu nula (što bi značilo da nema informacije o sjecištu iscrtane linije nepca i polarne mreže u programu za iscrtavanje). Takvom pretvorbom dobiveni su i grafovi na kojima su prikazane linije nepca za svakoga ispitanika (Slika 6). U Excelu se prikaz jedne slike može vidjeti kao graf s iscrtanom jednom linijom, no može se pretvoriti i u povezani graf svih linija iscrtanih za promatrani slučaj.

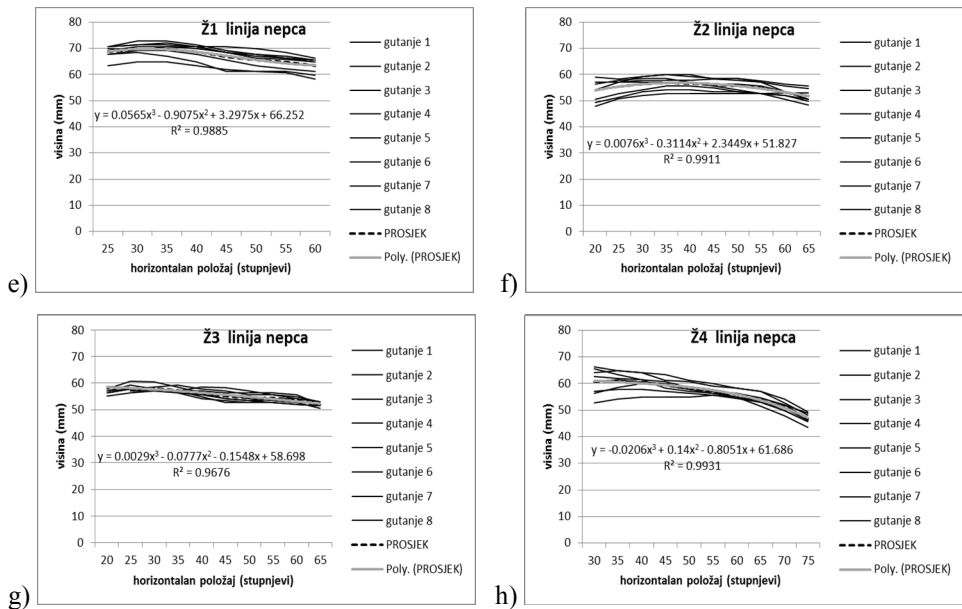
Kao kvantitativna mjera varijabilnosti nepca u analizi korišten je koeficijent varijabilnosti (KV) okomitoga pomaka, maksimalan okomiti pomak linije (najveća udaljenost između dviju linija nepca) i koeficijent determinacije.

3. REZULTATI TESTIRANJA STABILIZACIJSKOGA SUSTAVA FILIP I S.O.S.

Linija nepca pomoću ultrazvučne metode s različitim je uspjehom dobivena u nekoliko radova (Pouplier i sur., 2004; Stone, 2005a; Epstein i Stone, 2005; Whalen i sur., 2005; Stone i sur., 2007; Wrench i sur., 2011). Manje uspješna metoda je zadržavanje tekućine (vode) u ustima da bi ultrazvučni signal prošao i odbio se od prve granice, promjene gustoće tkiva (u ovom slučaju od nepca). Na ovaj način često se na snimkama vidi deblja bijela linija koju je teže anotirati ili pak zračni čep ispod jezika koji ometa da signal prođe do nepca. Drugi, uspješniji način jest dobivanje linije jezika pomoću gutanja i priljubljanja jezika uz nepce koji je korišten i u ovom istraživanju.

Na Slici 6 prikazani su dijelovi linije nepca za pojedinoga ispitanika u različitim vremenskim razmacima. Za analizu su iskorišteni samo vidljivi dijelovi nepca budući da to može biti kraća linija od cijeloga nepca kada jezična kost baca sjenu u stražnjem dijelu slike. Linije nepca dobivene su prije spomenutom pretvorbom polarnoga sustava u kartezijanski da bi prikaz linije odgovarao onoj na ultrazvučnoj snimci, tj. anatomskeg nepca.





Slika 6. Prikaz svih vidljivih linija nepca za svakoga ispitanika (slike a – h). Prednji dio nepca je s desne strane. Oznaka M označava muške ispitanike, Ž ženske, a brojevima se međusobno razlikuju.

Figure 6. Splines of palate for every subject. Front of palate is on the right. Label M is for male speakers, Ž for female with different numbers.

Koeficijent determinacije je označen na svakome grafu (Slika 6) kao R^2 , a linija prosjeka svih linija je označena isprekidano. Na Slici 6 se može vidjeti da različiti ispitanici imaju različitu duljinu apscise, tj. različitu duljinu nepca. Već je u metodi spomenuto da duljina nepca ovisi o vidljivosti linije i o iscrtanoj liniji nepca. Kod nekih je ispitanika jezična ili čeljusna kost bacala sjenu na liniju (npr. M1, M4, Ž1, Ž2, Ž3, Ž4) te ona nije vidljiva u optimalnoj duljini da bi podsjećala na anatomske oblik nepca. U takvim je slučajevima ispunjen zahtjev za vidljivom linijom koja se može usporediti s linijama u različitim vremenskim razmacima tijekom ultrazvučnoga snimanja. Opažajno različite linije kod ispitanika na Slici 6 (npr. Ž4) rezultat su slabije vidljivosti linije kod ručnoga iscrtavanja linije te su kao takve uzete u obzir radi kontrole i provjere budućih istraživanja s različitim anotatorima i različitom vidljivošću linije. Pokazalo se da je u ovome slučaju koeficijent

varijabilnosti za Ž4 manji (5,2%), ali još uvijek unutar ostalih stabilizacijskih sustava (maksimalan okomit pomak = 3,68).

Tablica 2. Maksimalan okomit pomak linije, koeficijent varijabilnosti i koeficijent determinacije za linije nepca za sve ispitanike

Table 2. Maximum of vertical spline movement, variability index and index of determination for all subjects

	Maks. pomak linije (nepce) (mm)	Koeficijent varijabilnosti (%)	Koeficijent determinacije	Maks. pomak linije u neutralnom položaju (mm)	Koeficijent varijabilnosti (%)
M1	6,34	5,1%	0,9748	3,00	3,5%
M2	4,57	2,9%	0,9988	3,70	3,7%
M3	3,63	5,1%	0,9974	2,53	2,2%
M4	3,80	3,8%	0,9882	2,41	3,0%
Ž1	5,87	4,3%	0,9885	5,50	4,5%
Ž2	4,26	4,5%	0,9911	4,74	5,9%
Ž3	1,58	2,4%	0,9676	3,31	4,3%
Ž4	3,68	5,2%	0,9931	3,61	3,8%

Najveću varijabilnost u liniji nepca pokazala je ispitanica Ž4, a najmanju ispitanica Ž3. Nakon kvalitativne analize prikaza linije nepca u koordinatnom sustavu vidljivo je da i ispitanik M3 ima malu varijabilnost linija u prikazu, a koeficijent pokazuje puno veću varijabilnost. Takav se rezultat može objasniti razlikom u udaljenosti između dviju linija koje u odnosu na apscisu imaju veći kut. Mjera okomitoga pomaka (točaka) linije manja je ako je linija polegnutija (paralelnija) u odnosu na apscisu, tj. ako je kut između linije nepca i apscise manji.

Radi veće pouzdanosti proveden je i test raspršenja koji u koeficijentu determinacije (R^2) pokazuje koliko su linije predvidljive u svom obliku ako se kao polazna u obzir uzme aritmetička sredina svih linija. Koeficijent determinacije pokazuje da je najpredvidljivija linija nepca ispitanika M2 i te su linije najmanje raspršene, a gotovo su jednako konzistentne i linije nepca ispitanice Ž1 i ispitanika M4. Najmanje predvidljivu liniju nepca ima ispitanica Ž4, što je pokazao i koeficijent varijabilnosti okomitoga pomaka linije nepca. I ovi rezultati ulaze u vrlo

visok stupanj konzistentnosti linije, tj. pokazuju vrlo malu raspršenost rezultata ($R^2 > 0,80$).

Kao kvantificirana mjera nakon analize podataka može se vidjeti i maksimalan pomak linije nepca po ordinati (Tablica 2) koji može poslužiti za usporedbu sa stabilizacijskim sustavima u drugim laboratorijima za ultrazvučno istraživanje govora (Tablica 1). Stabilizacijski sustav FILIP i sustav osnovne stabilizacije S.O.S. pokazuju maksimalan pomak od 6,34 mm što je unutar dopuštenoga pomaka ostalih stabilizacijskih sustava (Stone i Davis, 1995; Gick, 2002; Gick i sur., 2005; Horiguchi i Wilson, 2007; Bressmann, 2008; McLeod i Wrench, 2008; Miller i Finch, 2011). Ako usporedimo maksimalan pomak linije u neutralnom položaju (5,5 mm), može se zaključiti da je razlog veće varijabilnosti i slabije vidljiva (udaljenija) linija nepca koja je smještena najviše u odnosu na sve ispitanike (između 60 i 75 mm) (slika 6e). U analizi se pokazalo da je ispitanica Ž1 zbog višeg nepca pokazala i veću varijabilnost same linije, a razlog tome širi kut pod kojim zrake u polarnom sustavu presijecaju iscrtanu liniju jezika.

Uzrok slabije vidljivoj liniji nepca vjerojatno je udaljenost koju ultrazvučni signal mora proći da bi došao do granice u gustoći tkiva, manja razlika u gustoći tkiva i stoga slabije vidljiva linija dodira jezika i nepca te jezična i čeljusna kost koje stvaraju veću sjenu što je objekt koji se promatra viši (u širem kutu).

4. ZAKLJUČAK

Ultrazvuk se pokazao kao jedna od izrazito korisnih fizioloških metoda za slikovno prikazivanje govornih organa. Uz mnoge prednosti, izazovi koji nisu do kraja riješeni su stabilizacija sonde i ispitanika, kvantifikacija podataka te veća frekvencija uzorkovanja. U ovome se radu dao prikaz sadašnjih metoda stabilizacije u ultrazvučnim istraživanjima govora te detaljan prijedlog metode stabilizacije ispitanika (S.O.S.) i sonde (FILIP). FILIP (Fonetski imobilizator za laboratorijsko istraživanje proizvodnje) omogućuje stabilizaciju sonde pod bradom tijekom cijeloga ispitivanja, a S.O.S. (Sustav osnovne stabilizacije) osigurava nepomicanje glave ispitanika. Učvršćivanje (stabilizacija) sonde omogućuje usporedive podatke dobivene tijekom cijelog ispitivanja s određenim pomakom. Na Odsjeku za fonetiku u Laboratoriju za fiziološka istraživanja govora osigurana je metoda dosljednosti i pričvršćivanja sonde ispod ispitanikove brade tako da se pomicanjem ne mijenja kut emitiranja ultrazvučnoga signala. Istraživaču se omogućuje namještanje sonde da bi

se dobila optimalna kvaliteta ultrazvučne slike i zadržavanje položaja sonde koji je specifičan za svakoga ispitanika i za svaki promatrani događaj. U radu su uspoređeni različiti stabilizacijski sustavi za ultrazvučno istraživanje proizvodnje govora. Pokazalo se da metoda gutanja i priljublivanja jezika uz nepce daje dobru vidljivost nepca te se na taj način može lako anotirati i iscrtati. U radu se daju opisi različitih sustava stabilizacije ultrazvučne sonde u istraživanjima proizvodnje govora i njihovi rezultati, a maksimalan okomiti pomak između linija nepca dobivenih predloženim stabilizacijskim sustavima može se usporediti s prikazanim rezultatima. Prikazani su rezultati mjerenja pomaka sonde tijekom ispitivanja te se zaključuje da su rezultati podudarni s rezultatima drugih stabilizacijskih sustava za ultrazvučno istraživanje govora. Daljnji tijek istraživanja trebao bi uključiti korekciju pomaka sonde te kontrolu pomaka ispitanika i sonde pomoću kamere.

REFERENCIJE

- Bressmann, T.** (2008). Quantitative assessment of tongue shape and movement using ultrasound imaging. U L. Colantoni, J. Steele (ur.), *Selected Proceedings of the 3rd Conference on Laboratory Approaches to Spanish Phonology*, 101–106. Somerville, MA: Cascadilla Proceedings Project.
- Bressmann, T.** (2010). 2D and 3D ultrasound imaging of the tongue in normal and disordered speech. U B. Maassen, P. van Lieshout (ur.), *Speech Motor Control. New Developments in Basic and Applied Research*, 351–370. New York: Oxford University Press.
- Bressmann, T., Uy, C., Irish, J. C.** (2005). Analysing normal and partial glossectomee tongues using ultrasound. *Clinical Linguistics and Phonetics* **19**, 1, 35–52.
- Canopus.** (2003). *DV Storm Installation Manual* (2.01 izd.). San Jose: Canopus.
- Carmichael, B.** (2004). *The Comfortable Head Anchor for Sonographic Examinations (CHASE)*. Toronto: University of Toronto.
- Carović, I.** (2014). *Ultrazvučno istraživanje artikulacije i koartikulacije hrvatskoga voklaskog sustava*. Doktorski rad, Zagreb: Filozofski fakultet.
- Epstein, M. A., Stone, M.** (2005). The tongue stops here: Ultrasound imaging of the palate (L). *Journal of the Acoustical Society of America* **118**, 4, 2128–2131.
- Gick, B.** (2002). The use of ultrasound for linguistic phonetic fieldwork. *Journal of the International Phonetic Association* **32**, 2, 113–122.

- Gick, B., Bird, S., Wilson, I.** (2005). Techniques for field application of lingual ultrasound imaging. *Clinical Linguistics and Phonetics* **19**, 6–7, 503–514.
- Horiguchi, N., Wilson, I.** (2007). Head movement and tongue compression with a fixed ultrasound probe but a free head. New York: Ultrafest IV @ New York University.
- McLeod, S., Wrench, A. A.** (2008). Protocol for restricting head movement when recording ultrasound images of speech. *Asia Pacific Journal of Speech, Language and Hearing* **11**, 23–29.
- Mielke, J., Baker, A., Archangeli, D., Racy, S.** (2005). PALATRON: A technique for aligning ultrasound images of the tongue and palate. U D. Siddiqi, B. V. Tucker (ur.), *Coyote Papers: Working Papers in Linguistics* **14**, 96–107.
- Miller, A. L., Finch, K. B.** (2011). Corrected high-frame rate anchored ultrasound with software alignment. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* **54**, 471–486.
- Poupplier, M., Buchwald, A., Stone, M.** (2004). A tagged cine-MRI and ultrasound study of the German vowel system. *Working Papers and Technical Reports of Vocal Tract Visualization Laboratory* **6**, 1–55.
- Rahilly, J.** (2013). Data processing: Imaging of speech data. U N. Müller, M. J. Ball (ur.), *Research Methods in Clinical Linguistics and Phonetics: A Practical Guide*, 219–252. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Rutter, B., Cunningham, S.** (2013). The recording of audio and video data. U N. Müller, M. J. Ball (ur.), *Research Methods in Clinical Linguistics and Phonetics: A Practical Guide*, 160–176. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Scobbie, J., Wrench, A., van der Linden, M.** (2008). Head probe stabilization in ultrasound tongue imaging using a headset to permit natural head movement. U R. Sock, S. Fuchs, Y. Laprie (ur.), *Proceedings of the Eighth International Seminar on Speech Production*, 373–376. Strasbourg, France: INRIA.
- Stone, M.** (2005a). A guide to analysing tongue motion from ultrasound images. *Clinical Linguistics and Phonetics* **19**, 6–7, 455–501.
- Stone, M.** (2005b). Preface to the special issue on ultrasound imaging of the tongue. *Clinical Linguistics and Phonetics* **19**, 6–7, 453–454.
- Stone, M., Davis, E.** (1995). A head and transducer support system for making ultrasound images of tongue/jaw movement. *The Journal of the Acoustical Society of America* **98**, 3107–3112.
-

-
- Stone, M., Stock, G., Bunin, K., Kumar, K., Epstein, M., Kambhamettu, C., Li, M., Parthasarathy, V., Prince, J.** (2007). Comparison of speech production in upright and supine. *Journal of the Acoustical Society of America* 122, 1, 532–541.
- Whalen, D. H., Iskarous, K., Tiede, M. K., Ostry, D. J., Lehnert-LeHouillier, H., Vatikiotis-Bateson, E., Hailey, D. S.** (2005). The Haskins optically corrected ultrasound system (HOCUS). *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 48, 543–553.
- Wrench, A. A., Scobbie, J. M.** (2012). *High-speed Cineloop Ultrasound vs. Video Ultrasound Tongue Imaging: Comparison of Front and Back Lingual Gesture Location and Relative Timing*. Edinburgh: Queen Margaret University.
- Wrench, A., Cleland, J., Scobbie, J. M.** (2011). An ultrasound protocol for comparing tongue contours: Upright vs. supine. Hong Kong: ICPHS XVII.
-

Ines Carović

icarovic@ffzg.hr

Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Zagreb
Croatia

Comparison of stabilization systems for ultrasound research of speech

Summary

Ultrasound is one of the physiological methods for speech organs imaging. Since ultrasound cannot record both the tongue line and palate, detection of relative tongue line is harder (Stone, 2005a). The ultrasound beam passes through the tissue and reflects from the materials of different density (bone-muscle) or from air (tongue-air). This change is marked by a white line. Stabilization of the probe enables obtaining comparable results during whole testing with determined shift. During last 15 years ultrasound analysis has been developed and improved. Miller and Finch (2011) state that ultrasound recording becomes for articulatory phonetics what a spectrogram is for acoustic phonetics. This statement is confirmed by the fact that ultrasound is a rather cheap and safe method of recording speech organs in real time. Before the analysis of data obtained by ultrasound recording it is necessary to enable consistency in positioning the probe under the subject's chin as well as the stabilization of the subject himself/herself because every movement change the angle of the ultrasound signal transmission. In this paper different stabilization methods are compared. PHILIP (Phonetic immobilizer for laboratory investigation of production) enables stabilization of the probe under chin during the whole testing while SOS (system of basic stabilization) ensures stillness of subject's head. It gives a researcher an opportunity to place the probe in order to obtain the desired quality of the ultrasound result and to obtain the place of the probe that is specific to every subject and monitored event, respectively. The task of eight subjects who participated in the test was to pronounce 325 stimuli (sentences). Before every fiftieth reading of the stimulus the subject had to drink some water, swallow it, and keep the tongue on the palate. For each subject eight lines distant in time were obtained. The differences between the lines determined the movement of the probe. Specified movement of the probe enables correction of the method and its comparison to other systems. In this paper different stabilization systems of ultrasound probe in speech production research are compared. The description of stabilization system of probe (PHILIP) and subjects (S.O.S.) at the Department of Phonetics, University of Zagreb is given. Results of measurements of probe movement during testing are presented and they are compared with other stabilization systems developed in other laboratories for ultrasound speech research.

Key words: ultrasound (UTI), stabilization systems, S.O.S, PHILIP, spline of palate
