

磁気センサシステムによる発話観測における調音空間の計測

北村 達也[†] 能田由紀子^{††,†††,††††} 吐師道子^{†††††} 波多野博顕^{†††,††††}

[†] 甲南大学知能情報学部知能情報学科 〒 658-8501 兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1
^{††} ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタ 〒 619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2
^{††††} 県立広島大学保健福祉学部コミュニケーション障害学科 〒 723-0053 広島県三原市学園町 1-1
^{†††} 神戸大学大学院国際文化学研究科 〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲 1-2-1
^{††††} ATR 知能ロボティクス研究所 〒 619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2
E-mail: †t-kitamu@konan-u.ac.jp

あらまし Northern Digital Inc. の Wave speech research system (Wave) は発話器官に貼り付けた複数のセンサをトラッキングするシステムである。本研究では、Wave を用いた調音運動観測において被験者の咬合面と口蓋の形状を計測することによって調音空間を決定した。被験者の上顎の歯型(口蓋を含む)を Wave の 5 自由度センサを 4 個埋め込んだバイトプレート上に固定し、それを被験者にくわえさせることによって咬合面を計測した。計測によって得られた咬合面を調音空間の xz 平面とし、それに直交する線を y 軸とした。さらに、歯型の口蓋を Wave の口蓋計測用プローブでなぞることによって口蓋の形状を計測した。

キーワード NDI Wave speech research system, 咬合面, 口蓋, バイトプレート

A method of measuring articulatory space using NDI Wave speech research system

Tatsuya KITAMURA[†], Yukiko NOTA^{††,†††,††††}, Michiko HASHI^{†††††}, and Hiroaki HATANNO^{†††,††††}

[†] Faculty of Intelligence and Informatics, Konan University
8-9-1, Okamoto, Higashinada, Kobe, Hyogo, 658-8501 Japan
^{††} Brain Activity Imaging Center, ATR-Promotions
2-2-2, Hikaridai, “Keihanna Science City”, 619-0288 Japan
^{††††} Department of Communication Sciences and Disorders, Faculty of Health and Welfare, Prefectural University of Hiroshima 1-1, Gakuen-cho, Mihara, Hiroshima 723-0053 Japan
^{†††} Research Center for Media and Culture, Graduate School of Intercultural Studies, Kobe University
1-2-1, Tsurukabuto, Nada, Kobe, Hyogo, 657-8501 Japan
^{††††} ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories
2-2-2, Hikaridai, “Keihanna Science City”, 619-0288 Japan
E-mail: †t-kitamu@konan-u.ac.jp

Abstract The Wave speech research system of Northern Digital Inc. is a type of electromagnetic articulograph that can track the position of small sensors placed on the articulator. In the present study, we measured the individual articulatory space of subjects on the basis of the occlusal plane and the shape of the palate. We made a biteplate with four five-degree-of freedom sensors and mounted an impression of the upper teeth and the palate on it, and measured the occlusal plane using it. The xz -plane was defined by the longitudinal and lateral axes of the biteplate and the y -axis was defined as a surface normal of the xz -plane on the mid-sagittal plane. The shape of the palate was also measured by tracing the palate of the impression by a pen-style sensor or palate probe and was mapped into the articulatory space.

Key words NDI Wave speech research system, Occlusal plane, Palate, Bite plate

1. はじめに

調音運動のほとんどは身体の外から目視で観察しにくいので、これまでに様々な観測手法が開発されてきた [1]. その中の 1 つに磁気センサシステムがある. このシステムは磁気を利用して発話器官に貼り付けた小型のペレット (センサ) の位置を計測するもので, 計測点は限定されるものの, 時間分解能が高い, 計測時の騒音がない, 非侵襲性である, 実験データの取り扱いがしやすいなど多数の利点を有する.

Northern Digital Inc. の Wave speech research system (以下, Wave と略) [2] は, 磁気センサシステムの 1 種である. このシステムでは, フィールドジェネレータ (図 1 参照) によって発生させる磁場内のセンサの位置を最大 400 Hz の標本化周波数で計測することができる. Wave には可搬性があることや被験者の姿勢の自由度が高いこと, さらにセンサが出荷時にキャリブレーション済みであることなど他の磁気センサシステムにはない利点がある. これらに加えて, Wave 装置のレンタルサービスと実験支援サービスというソフト面が整備され, ノウハウが蓄積されてきたこともあり, 日本国内でも Wave を利用した研究が徐々に増えつつある [4] [5] [6]. 吐師ら [4] は Wave を用いて姿勢変化に伴う調音運動の差異を調査しており, 立川ら [5] は話しにくさを自覚する人とそうでない人の調音運動の差異を Wave を用いて計測し報告している.

Wave を用いた標準的な計測では複数の種類のセンサを用いる. これらはいずれも有線センサで, 発話器官に貼り付ける 5 自由度 (5D) センサ, 計測空間の原点を定義する 6 自由度 (6D) センサ (リファレンスセンサ), 口蓋計測用の 6D プロブの 3 種類である. 5D センサのセンサ部のサイズは $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ であり, リファレンスセンサは 5D センサを 2 つ組み合わせたものである. この 5D センサに接続されているツイストペアワイヤは太く (1 本のワイヤの直径は 0.4 mm), 柔軟性に欠けるため発話を阻害する可能性があるが, 現在北村ら [3] によって細く, 柔軟性の高いワイヤに交換する試みが進められている. また, 口蓋計測の際には被験者が口蓋計測用プロブを持って自身の口蓋をトレースすることが想定されているが, 著者らが試みた限りでは精度と再現性に欠けるという問題がある.

調音運動観測の結果を被験者内, 被験者間で比較するためには, 解剖学的基準点に基づいた再現性のある手段で調音空間を規定する必要がある. そのような基準として咬合面が使われることが多い [7] [8] [9] [10]. 一般的に咬合面は被験者にバイトプレートをくわえさせることによって計測する. Rudy [9] は Wave を用いた調音運動観測において 6D センサをつけたバイトプレートを使って咬合面を計測している. Ji ら [10] は被験者の上顎の歯型に Wave の 5D センサを埋め込んで咬合面を計測している. この方法は, 歯型を利用しているため正中矢状面を正確に計測できる上に計測の再現性が高いという利点がある. しかし, Rudy [9] と Ji ら [10] では調音空間への口蓋形状のマッピングは考慮されていない. 本稿では, Wave を用いた調音運動計測においてバイトプレートを用いて咬合面を計測する手法を提案する. 計測には精度と再現性を確保するため Ji ら [10] と

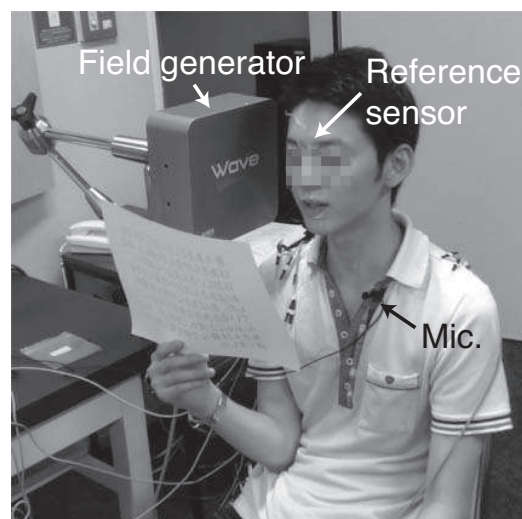


図 1 Wave を用いた調音運動計測の様子

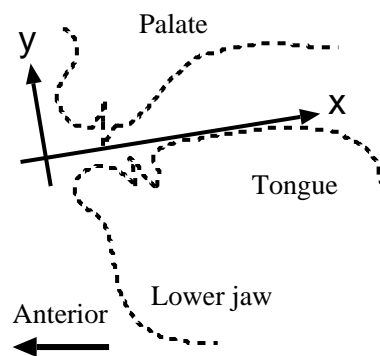


図 2 xy 平面の定義. x 軸は正中矢状面と咬合面が直交する直線, y 軸は正中矢状面上の x 軸と直交する直線.

同様に歯型を用い, さらに口蓋形状を採取し口蓋計測用プロブでこれをトレースすることで調音空間への口蓋形状の正確なマッピングを実現した. 実際にバイトプレートを装着した被験者実験によって口蓋接触の調音観測を行ない, 提案手法の有効性の検証を行なった.

2. 調音空間の計測方法

本研究では, 咬合面の前後方向を調音空間の x 軸とし, 左右方向を z 軸, xz 平面に直交する線を y 軸とする (図 2 参照). xy 平面は正中矢状面になるよう設定する.

咬合面計測のために図 3 のようなバイトプレートを製作した. このバイトプレートは, $50\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ のアクリル板に切削加工機で穴を掘り, そこに 4 個の 5D センサを埋め込んだものである. 前後のセンサと左右のセンサの中心を結ぶ線には溝を切り, 歯型の位置合わせを容易にしている. このバイトプレートの使用時にはポリエチレン製のカバーをかぶせ, それを被験者ごとに交換することによって, バイトプレートと 5D センサの再利用を可能にしている. なお, 咬合面は 2 本の切歯の先端と左右の臼歯の先端を結ぶ面と定義されるが, 本研究では手続きの簡便さを考慮して上記の方法を採り, これを咬合面と呼ぶ.

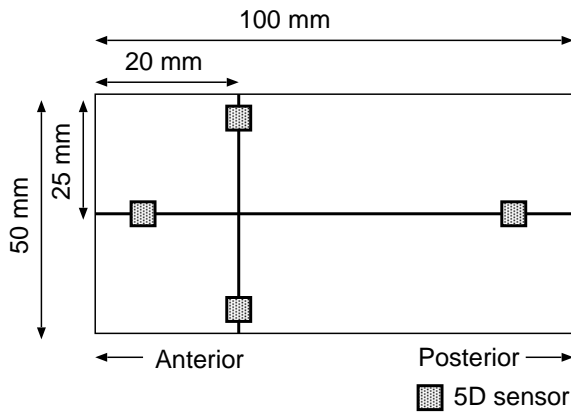


図3 バイトプレート

咬合面計測の際には、まず歯科用印象材を用いて被験者の上顎の歯型を口蓋の形状も含めて採取する^(注1)。次に、その歯型の正中矢状面をバイトプレートの前後方向の中心線に一致させるようにバイトプレートに固定する。歯型を固定したバイトプレートを被験者にくわえさせればバイトプレートの中心線と正中矢状面がずれることがなく、また、バイトプレートの面が咬合面と一致する。そして、その状態でバイトプレート上のセンサの位置(正確には、鼻根点に貼り付けたリファレンスセンサからの相対位置)を計測することによって、咬合面を計測することができる。

被験者の歯型を取得する際に口蓋形状も取得するのは、口蓋形状を計測するためである。歯型を固定したバイトプレートにリファレンスセンサを固定し、口蓋計測用プローブで口蓋部分の正中矢状面をなぞる。これによって、バイトプレート上の4つの5Dセンサに対する相対的な口蓋の座標を正確に計測することができる。

3. 実験方法

3.1 被験者

成人2名(男女各1名)が参加した。いずれも発話に関連する既往症はない。実験に関する説明を受け、同意書にサインした後に実験に参加した。

3.2 手続き

実験は、歯型取得、咬合面計測、調音運動計測、口蓋形状計測の順番で実施した。なお、実験の手続きについては甲南大学の倫理審査を受けている。

3.2.1 歯型取得

歯科印象取得用トレー(ジーシー、ディスポーザブルトレー有顎用上顎Mサイズ)に1cm角の両面テープを置き、その上に歯科用のシリコン印象材(P.D.R., Silicon scharf)をのせる。その状態で被験者にくわえさせ、硬化後にトレーから歯型を取り外す。トレーに置いた両面テープは歯型をバイトプレートに固定するためのものである。また、歯型の底面を咬合面と一致させるため、被験者の上歯列をトレーに接触させるようにして歯型を取った。そのために、被験者自身にトレーを押さ

(注1)：口蓋形状を含むものの、以降単に歯型と呼ぶ。

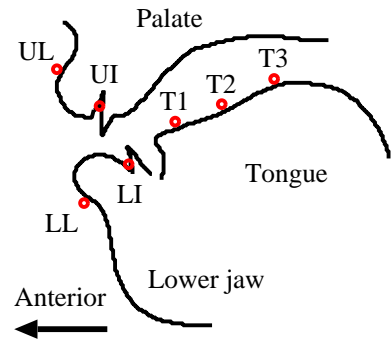


図4 5Dセンサの貼り付け位置(Tn: tongue no. n, UL: upper lip, LL: lower lip, UI: upper incisor, LI: lower incisor)

させるのではなく、実験者が被験者の歯列にトレーを押しつけるようにした。

なお、例えば被験者の口蓋ボリュームに対する印象剤の分量などの要因で、得られた歯型の口蓋形状が実際の口蓋形状と一致しているとは限らない。そのため、本研究では行っていないが、被験者の口蓋に食紅を塗ってから歯型をくわえさせ歯型への食紅の付き方を見るなどの方法で口蓋形状との対応関係を見るのが望ましい。

3.2.2 咬合面計測

歯型上の2本の切歯の中間点と両側の第一大臼歯の中間点を結ぶ線を正中矢状面とし、それがバイトプレートの中心と一致するように上記の両面テープで固定した。その際、バイトプレートをポリエチレンの袋で覆い、被験者交替の際にはその袋を交換した。これによって被験者交替の際にバイトプレートを殺菌処理する必要がない。次に、リファレンスセンサを被験者の鼻根点に固定した後、被験者にバイトプレートをくわえさせた。その状態でバイトプレートの5Dセンサの位置(リファレンスセンサからの相対位置)を約10秒間計測した。リファレンスセンサの接着には化粧用接着剤(三善、スピリッツガム)を用いた。

3.2.3 5Dセンサの接着

正中矢状面上の図4に示す7カ所に5Dセンサを貼り付けた。ただし、被験者のうち1名(男性)はUIに5Dセンサが接着できず、6カ所のみ計測した。舌上および歯茎への接着には医療用接着剤(東亜合成、アロンアルファA)を用い、口唇への接着にはリファレンスセンサと同様に化粧用接着剤を用い、その上からサージカルテープで固定した。舌上に5Dセンサを貼り付けた様子を図5に示す。

5Dセンサはワイヤを細く柔軟性の高いワイヤに交換したものの[3]を使用した。舌尖を用いる子音の調音に配慮し、T1は舌尖から約10mmの位置に貼り付けた。舌尖からT1, T2, T3までの間隔は、男性被験者では7.5mm, 18.5mm, 36.0mm、女性被験者では10.0mm, 25.5mm, 37.0mmであった。

3.2.4 調音運動計測

発話タスクは「アパ、アタ、アチャ、アニヤ、アキ、アケ、アク、アカ、アコ」および昔話「桃太郎」の冒頭部分である。前者は、計測した口蓋形状と舌上の5Dセンサとの位置関係を確認するためのものである。調音運動計測の標本化周波数は400

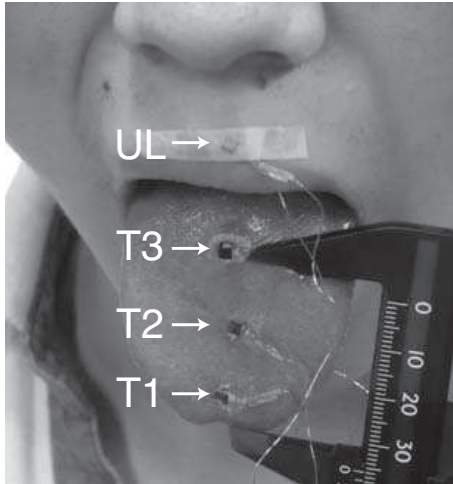


図5 T1, T2, T3, UL の5D センサを貼り付けた様子. 舌上の5D センサは医療用接着剤にて接着し, 口唇の5D センサは化粧品用接着剤にて接着した上からサージカルテープで固定した.

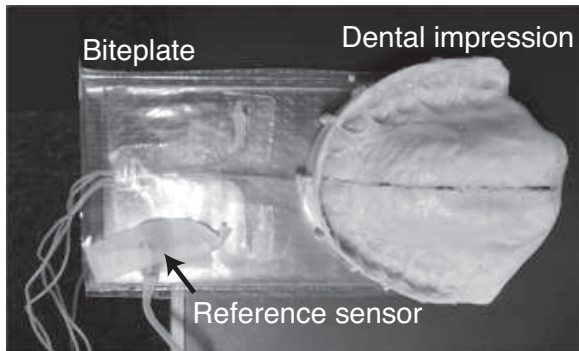


図6 歯型を固定したバイトプレート. バイトプレートの左側から出ている4本のワイヤはバイトプレートに埋め込まれた4個の5D センサのもの.

Hz である. Berry [11] による Wave の精度評価の結果を参考に, フィールドジェネレータから正中矢状面までの距離を 20 cm 以内に保つようにした (図1 参照). 被験者にはデータ収集の合間に実験者と会話させて, 可能な限りセンサを装着した状態で発話に慣れてもらうようにした.

調音運動と同時にマイクロフォン (Sony, ECM-77B) と USB オーディオ (M-Audio, Fast Track) を用いて音声も収録した. 標準化周波数 22.05 kHz, 量子化 16 bit である.

3.2.5 口蓋形状計測

歯型をのせたバイトプレートにリファレンスセンサを固定し (図6), 歯型の口蓋の正中矢状面を口蓋計測用プローブでトレースした.

3.3 調音空間の決定および口蓋形状の位置合わせ

被験者にバイトプレートをくわえさせて計測した (3.2.2 節参照) バイトプレート上の4個の5D センサの位置から調音空間の x, y, z 軸を決定した. 計測された位置データには若干の変動 (ノイズ) が含まれるため, 各センサについて計測データの重心座標を求め, その値を当該のセンサの位置とした. 次に, 被験者の調音運動データ (3.2.4 節) を上で決定した調音空間の座標に変換した. この作業は3次元アフィン変換を用いて行っ

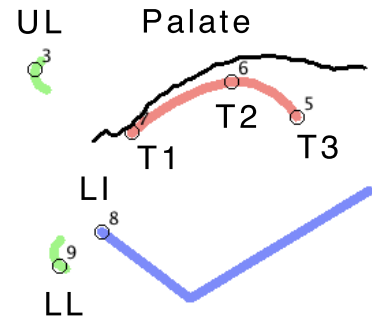


図7 「アチャ」の/ty/の摩擦部分の計測結果

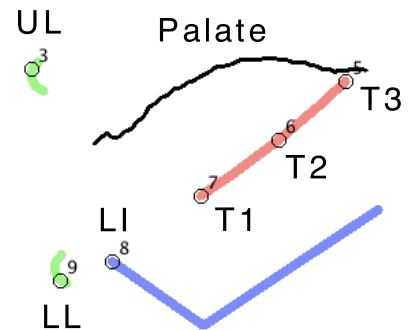


図8 「アカ」の/k/のバースト部分の計測結果

た. 最後に, 口蓋計測用プローブにて計測した歯型の口蓋形状 (3.2.5 節) を調音空間上にマッピングした.

4. 結果と考察

女性被験者の「アチャ (/atya/)」の/ty/の摩擦部分と「アカ (/aka/)」の/k/ のバースト部分における計測結果を VisArtico [12] にて表示させた結果をそれぞれ図7, 8 に示す. 口蓋の形状は3.2.5 節に示した方法で取得したものである. LI から引かれている L 字型の線は下顎を模したものであり, 計測によって得られたものではない.

図7中の T1, T2 は硬口蓋に近接しており, 図8中の T3 は口蓋の後方, つまり軟口蓋に近接している. /ty/の摩擦部分の調音位置は後部歯茎で, /k/のバースト部分の調音位置は軟口蓋であるので, 口蓋の形状と調音運動が正確に計測されているといえる. 上述のように, Wave を用いた計測では被験者自身が口蓋計測用プローブで口蓋をトレースすることが想定されているが, 精度と再現性に欠ける. 一方, 本研究で提案した手法では歯型を用いるため精度と再現性の高いトレースが期待できる. ただし, 複雑な凹凸のある口蓋を手でトレースするため, 最大で数 mm のオーダーの誤差が見込まれる.

また, 本研究では口蓋の正中矢状面のみ計測したが, 歯型の

口蓋全体を口蓋計測用プローブでトレースすれば口蓋の3次元形状を計測することができる。Yunusovaら[13]は、Waveを用いて口蓋の3次元形状をトレースし、計測点から口蓋形状を関数近似する手法を報告している。このような手法を用いることによって口蓋の形状と調音運動の関係に関する研究(例えば[9][14])を進めることができる。

5. おわりに

本研究では、Waveを用いた調音運動計測における調音空間の決定法を提案した。この手法では、歯型を固定したバイトプレートを利用することによって精度と再現性の高い咬合面計測を行い、調音空間の x , y , z 軸を決定した。さらに、歯型に口蓋を含めることによって口蓋形状の計測も実現した。

現在、Waveを用いた計測に関しては実験手続きを記載したマニュアルの整備も進んでいる。今後、音声から調音運動の逆推定([15]など)、音声合成における調音運動データの活用([16]など)、語学学習におけるフィードバックとしての活用([17]など)、発話訓練の効果の評価([18]など)などの研究分野でのWaveの利用が期待される。

謝辞

本研究は平成26年度科学研究費(25240026, 24652085, 25280066, 25884099)の支援を得て行われた。歯型及び口蓋印象採取方法に関してご教示いただきました三原市つちはし歯科医院院長 土橋加伸先生、センサ貼り付け用接着剤についてご教授いただきました大阪工業大学情報科学部 平山亮先生、バイトプレートの試作にご協力いただきました甲南大学知能情報学部 梅谷智弘先生に感謝いたします。本稿の一部は第59回日本音声言語医学会総会・学術講演会における議論が反映されている。

文 献

- [1] 鎗木時彦, 正木信夫, 元木邦俊, 松崎博季, 北村達也, 音声生成の計算モデルと可視化, コロナ社 (2010).
- [2] Wave speech research system, <http://www.ndigital.com/msci/products/wave-speech-research/>
- [3] 北村達也, 能田由紀子, 波多野博顕, 吐師道子, 西谷実, 発話観測システム NDI Wave のセンサの改良, 情報処理学会研究報告, 2013-MUS-99, 7, 6 pages (2013).
- [4] 吐師道子, 北村達也, 能田由紀子, 姿勢変化に伴う母音調音の変化: NDI 社 WAVE を用いて, 音講論 (春), 527-528 (2014).
- [5] 立川涉, 小澤由嗣, 吐師道子, 能田由紀子, 話しにくさを自覚する健常者の調音動態の解析: 歯茎弾き音について, 音講論 (秋), 1583-1586 (2014).
- [6] 船津誠也, 今泉敏, 子音クラスタ構音時のクラスタ構成要素による影響, 日本音声言語医学会・学術講演会 プログラム・予稿集, 73 (2014).
- [7] J. R. Westbury, *X-ray microbeam speech production database user's handbook ver. 1*, Madison, UW-Madison (1994).
- [8] 吐師道子, X線マイクロビーム日本語データベース, 音声研究, 4, 2, 31-35 (2000).
- [9] K. Rudy, The effect of palate morphology on consonant articulation in healthy speakers, Master thesis, Department of Speech-Language Pathology, University of Toronto (2011).
- [10] A. Ji, M. T. Jonson and J. Berry, Articulatory space calibration in 3D electro-magnetic articulography, *Proc. of Chi-naSIP 2013*, 155-159 (2013).
- [11] J. J. Berry, Accuracy of the NDI Wave speech research

- system, *J. Speech, Lang., and Hear. Res.*, 54, 1295-1301 (2010).
- [12] S. Ouni, L. Mangeonjean and I. Steiner, VisArtico: A visualization tool for articulatory data, *Proc. of Interspeech2012* (2012).
- [13] Y. Yunusova, M. Baljko, G. Pintilie, K. Rudy, P. Faloutsos and J. Daskalogiannakis, Acquisition of the 3D surface of the palate by in-vivo digitization with Wave, *Speech Commun.*, 54(8), 923-931 (2012).
- [14] M. Hashi, J. R. Westbury and K. Honda, Vowel posture normalization, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(4), 2426-2437 (1998).
- [15] S. Hiroya and M. Honda, Estimation of articulatory movements from speech acoustics using an HMM-based speech production model, *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, 12(2), 175-185 (2004).
- [16] Z.-H. Ling, K. Richmond, J. Yamagishi and R.-H. Wang, Integrating articulatory features into HMM-based parametric speech synthesis, *IEEE Trans. on Audio, Speech and Lang. Processing*, 17(6), 1171-1185 (2009).
- [17] 末光厚夫, 党建武, 伊藤貴之, M. Tiede, 調音フィードバックシステムによる発音訓練後の学習効果の持続性についての検討, 音講論 (秋), 409-410 (2014).
- [18] W. F. Katz, S. V. Bharadwaj and B. Carstens, Electromagnetic articulography treatment for an adult with Broca's aphasia and apraxia of speech, *J. Speech, Lang, Hear., Res.*, 42, 1355-1366 (1999).