磁気センサによる調音運動の計測 - 舌ペレットの傾きとずれを考慮したセンサ配置 -

学生員 緒 方 公 一 (熊本大)

正 員 園 田 頼 信 (熊本大)

Articulatory Measuring System Using Magnetometer Sensors

- Studies of Sensor Arrangements for Reducing Errors Caused

by Tilting and Lateral Movements of a Magnetic Pellet -

Kohichi Ogata, Student-member, Yorinobu Sonoda, Member (Kumamoto University)

The purpose of this paper is to propose an appropriate sensor arrangement of magnetometer sensing system for monitoring tongue point movements during speech. The system consists of a small permanent magnetic rod which is fixed on the tongue surface, and magnetometer sensors with two amorphous alloy cores. On the detection of the magnet's positions in the magnetic sensing system, tilting and lateral movements of the magnetic rod on the tongue cause errors which are serious problems on measuring articulatory movements.

Several sensor arrangements were studied to reduce these errors by means of computer simulation. Experimental results showed that the errors can be effectively reduced by setting four sensors at each side of the jaw where the sensors detect positions and inclination angles of the magnetic rod. Experiments based on the simulation were also done on one point of the tongue surface, and characteristic patterns on the tongue articulatory movements were observed during several speech sounds.

キーワード：位置検出器，磁気センサの応用，アモルファス磁性線，発話過程，調音運動の計測

1. まえがき

人間の音声に近い自然な音声の合成・連続音声の認識の実現のためには、音声波の分析だけでなく、調音器官そのものについて運動計測を行い、その生理的・物理的な特性を把握することが重要である⁽¹⁾。調音器官のうち舌は特に重要な役割を担っているが、その運動が外部から直接観測できないため特別な計測手法が必要となる。最も一般的な方法としてX線映画撮影法⁽²⁾があるが、被験者のX線曝射量や膨大な画像データの解析処理の問題から収集・処理される発話データ数に制限があった。

著者らは安全かつ容易に多量のデータを収集することを目的として、磁気センサを用いた計測システムの開発を行っている⁽³⁾⁽⁵⁾。このシステムはペレットとして計測点に取り付けた永久磁石からの磁界強度が、磁石と磁気センサ間の距離に関係することを利用したものであり、舌上の磁石位置を検出することで舌の動きを計測する。位置検出器としての磁気センサは、感度および安定度で優れている磁気マルチバイブレータブリッジ型回路⁽⁶⁾から構成されており、磁心には高透磁率磁性体であるアモルファス磁性線を用いた2磁心型のセンサ⁽⁷⁾である。本方法は、微小な棒磁石を舌に取り付けるだけなので被験者の負担が少なく、またセ

ンサの位置検出特性が理論式によく一致するので、理論式が実験式として適用でき、多点の計測ができる特長がある。

この方法で位置検出を行う際には、磁石の運動に付随して起こる磁石ペレットのセンサ軸に対する傾きや、計測平面からのずれは、磁界強度を変化させ、位置検出誤差の原因となる⁽⁵⁾。送受信コイルを用いた交流磁界による他の計測法においても、舌に取り付けるコイル等の傾きやずれは重要な問題となっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本論文では、このようなずれや傾きによる誤差をシミュレーションにより考察し、これらの影響を軽減する適切なセンサ配置を提案した。更に、舌の調音運動の計測実験を行い、開発した計測システムの有効性を確かめた。

2. 磁石の位置と傾きの検出原理

図1は1個の磁石の位置および傾きを検出するときの磁石とセンサの座標関係を示したものである。ここで、センサは磁界のZ方向成分を検出するものとし、検出に必要なセンサの数をm個とする。また、舌に取り付けた磁石はZ軸に垂直な平面(計測面)内だけを移動するものと仮定する。磁石の傾きは、その軸と各座標軸とのなす角として定義し、それぞれ、 θ_x 、 θ_y および θ_z で表す。ただし、磁石の軸がZ軸と平行のときに傾きのない状態とし、このと

き $\theta_z = 0^\circ$ ($\theta_x = \theta_y = 90^\circ$) となる。

磁石をその磁気モーメントが M の磁気双極子とみなすと、センサ S_i ($i=1, \dots, m$) が検出する磁界 H_{zi} は (1) 式で表される⁽¹⁰⁾。センサは磁界 H_{zi} に応じた出力電圧を発生する。この場合に、両者の間には近似的に線形関係が成立するとみなしているが、この関係は実験でも確かめられている⁽⁵⁾。センサの出力電圧から磁石の座標 (x, y) と傾き (θ_x, θ_y) を求めるには、(1) 式を基にした非線形連立方程式を解けばよい。1 個の磁石について 4 個の変数 $(x, y, \theta_x, \theta_y)$ が存在するので、磁石を n 個使用する場合には変数は $4n$ 個となり、 $4n$ 個以上のセンサが必要である。

3. センサ配置

(1) 式の太括弧内 $\{\}$ の第 2 項は専ら磁石の傾きによって生じるセンサの出力変化を示し、 $|z - c_i|$ を小さくすることで、その影響を軽減できる。これとは逆に、磁石の傾きを検出する場合には、その傾きによるセンサの出力変化がある程度大きくなるような状態で、すなわち、(1) 式で $|z - c_i|$ が大きくなるような位置にセンサを配置して検出することが望ましい。これらはそれぞれ、センサを顎の下、頬の横に配置することに相当する。

出力特性に及ぼす傾きの影響を考慮し、顎の下に配置する方法 (第 4 章)、および頬の横に配置する方法 (第 5, 6 章) の 2 通りのセンサ配置について、シミュレーションにより検討した。

$$H_{zi} = -\frac{K}{r_i^3} \left\{ [r_i^2 - 3(z - c_i)^2] \cos \theta_z - 3(z - c_i)[(x - a_i) \cos \theta_x + (y - b_i) \cos \theta_y] \right\} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (1)$$

ただし、

$$r_i^2 = (x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2$$

$K = M / (4\pi\mu)$ (M : 磁気モーメント強度、

μ : 透磁率)

$$\cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_y + \cos^2 \theta_z = 1$$

図 1 磁石とセンサの配置

Fig.1. Geometric configuration of a magnetic rod (x, y, z) and magnetometer sensors (a_i, b_i, c_i) .

4. センサを顎の下に配置する方法

図 2 は、磁石の傾きやずれがない、もしくは無視できるほど小さいときのセンサ配置を示しており、3. で述べたように、これらの影響を軽減するためにセンサを顎の下に配置している⁽⁵⁾。この場合、磁石の傾きを考慮しないという条件で、2 個のセンサで磁石の位置 (x, y) を検出することができる。そのため、磁石の運動に伴う磁軸のセンサ軸 (Z 軸) に対する傾きや、計測平面 (X-Y 平面) からのずれ (Z 方向へのずれ Z_g) がある場合にはセンサの検出する磁界強度を変化させ、位置検出誤差を生じる原因となる。

図 3 は、磁石のずれおよび傾きの 2 つの要因による位置検出誤差のシミュレーション結果を、距離誤差の標準偏差 (SDP) で示したものである。ここでは、磁石の傾き (θ_z) が $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ の各場合について、パラメータとして θ_z (θ_x, θ_y) の表現で示している。なお、2 個のセンサの間隔は 80 mm とした。発話中に磁石は主に Y-Z 平面 (垂直面) 内で傾く、すなわち、 θ_x よりも θ_y の方が大きく変化するという傾向が報告されているので⁽¹⁰⁾、ここでは θ_z と θ_y の変化についてのみ取り扱っている。また、誤差の評価は計測平面上 60 mm × 60 mm の領域を対象としている。

図 2 センサの配置 (顎の下)

Fig.2. Arrangement of magnetometer sensors for monitoring positions (x, y) of a magnet.

図 3 位置検出誤差 (センサ配置: 図 2)

Fig.3. Results of detection errors when distance (D) between two sensors is 80 mm.

図に示すように、誤差変化は、傾き $\theta_z = 0^\circ$ のとき以外は計測平面からのずれ $Z_g = 0$ mm に対して非対称になる。例えば、傾きが 10° の場合には $Z_g = -5$ mm 程度で誤差が最小になる。これは、磁石がセンサから遠ざかる（ずれる）ことによる磁界強度の減少と、磁石の傾きによる磁界強度の増加とが合成された結果、全体として磁界強度の変化が小さいことに起因している。

誤差が 1 mm 以内となるずれは、磁石の傾きがない場合 $-6 \sim 6$ mm 程度、磁石の傾きが 10° の場合 $-9 \sim 2$ mm 程度となる。しかし、 20° の例が示すように、磁石の傾きが大きい場合には、磁石がずれないときでも ($Z_g = 0$ mm)、その誤差は許容できないものとなっており、傾きを検出し距離誤差の補正を行うなどの処置が不可欠である。

5. センサを頰の横に配置する方法

3. で述べたように、磁石の傾きを検出する場合には、磁石の傾きによるセンサの出力変化が大きくなるような位置にセンサを配置して検出することが望ましい。ここでは図4に示すように、センサを頰の横に配置する方法（実線）について検討する。実線のセンサの他に点線で示すセンサをも付加した方法については6章で述べる。

<5.1> 角度の変換 2. では検出の都合上、磁石の傾きを θ_x 、 θ_y および θ_z で表現したが、視覚的に理解しやすいように角度の変換を行う。図5 (a) は、磁石の傾きについて新たに導入する角度表現を示したものである（図1参照）。また、(b) は、舌に取り付けた磁石との対応関係を示した概略図である。図中、角度 A は Z 軸と磁軸とのなす角を示し、磁軸が Z 軸に対して平行の場合が傾きのない状態である。また角度 A_y および A_x は、 A を Y 軸回りの回転（水平方向の傾き成分）と X 軸回りの回転（垂直方向の傾き成分）としてそれぞれ表現したものであり、両者を比較することで傾きの方向を知ることができる。

図4 センサの配置（頰の横）

Fig.4. Arrangements of magnetometer sensors for monitoring positions (x, y) and inclination angles (θ_x, θ_y) of a magnet. Case-I: Four sensors are set at one side of jaw. Case-II: Four sensors are set at each side of jaw.

なお、傾き ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) から (A, A_y, A_x) への変換は (2) 式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos \theta_y}{\cos \theta_z} \right\}, \quad A_y = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos \theta_x}{\cos \theta_z} \right\} \\ A &= \theta_z \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

<5.2> 磁石のずれの影響 2. の検出原理では、磁石の計測平面からのずれ (Z_g) は 0、もしくは無視できると仮定しているため、計測中にずれが生じる場合には位置検出誤差、角度検出誤差をもたらす要因になる。

図6は ($z - c_i$) = -100 mm、センサ間隔 $D = 60$ mm とした場合の磁石のずれ (Z_g) に対する検出誤差を標準偏差で表したものである。(a) は位置検出誤差 (SDP)、(b) は角度検出誤差 (SDA) を、それぞれ示している。なお、角度検出誤差は、ずれのない場合とある場合における磁軸のなす角で評価している。ずれが大きくなるにつれて、これらの誤差は急激に増加する。位置誤差 1 mm に許容されるずれはわずか $-1 \sim 1$ mm 程度である。

このように本方法では、ずれのない場合 ($Z_g = 0$ mm) であれば、磁石の位置と傾きを正確に検出することが可能であるが、磁石のずれによる影響を受けやすく、センサを頰の下に配置し磁石のずれや傾きを無視して位置検出を行う4.の方法よりも精度的に劣る可能性がある。そこで、6.

図5 舌上の磁石と傾き角度の関係

Fig.5. Definition of inclination angles of a magnetic rod (a) and schematic diagram of the magnetic pellet on the tongue surface (b).

図6 磁石のずれ(Z_g)に対する検出誤差
(センサ配置：図4 (I))

Fig.6. Detection errors caused by lateral movements(Z_g) with the one-side arrangement (I) in Fig.4. (a) position (x, y), (b) angle A .
($(z - c_i) = -100$ mm, $D = 60$ mm).

では、問題解決の一方法として、図4の点線の部分にもセンサユニットを付加し、頬の両側にセンサを配置する方法について述べる。

6. センサを頬の両側に配置する方法

<6.1> センサ配置とずれの影響 磁石が Z 方向にずれる場合、すなわち計測平面からずれる場合、その方向がセンサに近づくか、あるいは遠ざかるかによって、センサの検出する磁界強度は、ずれのない場合($Z_g = 0$ mm)の磁界強度を基準として増減する。この増減に応じて、計測面上に見い出される磁石位置は、ずれのない場合の磁石位置よりもセンサに対し近くまたは遠くなる。従って、計測面に関してセンサの位置と対称な位置にもう一つの同一のセンサユニットを配置すれば、磁石のずれによる磁界強度の増減は、これらのセンサ間では互いに逆方向となり、計測面に関して相対する2組のセンサユニットを用いて検出を行うことで、ずれによる誤差の軽減が期待できる⁽¹¹⁾。図4に示すように、点線で示すセンサユニットを新たに付加し、すなわち計測面に関して相対する2組のセンサを一組として、8個のセンサを用いて、磁石の位置および傾きを検出

図7 磁石のずれ(Z_g)に対する検出誤差
(センサ配置：図4 (II))

Fig.7. Detection errors caused by lateral movements(Z_g). (a) position (x, y), (b) angle A . Solid lines correspond to the arrangement (II) and dashed ones to the case of (I) in Fig.4. ($|z - c_i| = 100$ mm, $D = 60$ mm).

する方法が考えられる。この場合(1)式は、式が8個、変数が4個の非線形連立方程式となる。ここではニュートン法⁽¹²⁾を用いてこれらの解を求めている。

図7は $|z - c_i| = 100$ mmとして、前と同様に磁石のずれに対する位置と角度のそれぞれの検出誤差を示したものである。なお、センサ間隔は $D = 60$ mmとしているが、これはセンサのS/N特性および計測実験を行う空間的な余裕から決定した⁽¹¹⁾。比較のため片側にセンサユニットを配置した結果(図6)を破線で示している。傾きが $\theta_z = 10^\circ$, $\theta_x = 90^\circ$, $\theta_y = 80^\circ$ の例では、検出誤差1 mmに許容される磁石のずれは、5.の方法では $-1 \sim 1$ mm程度であるのに対して、本方法では $-10 \sim 4$ mm程度と大幅に改善されている。また、磁石の位置だけを検出する4.の方法と比較しても優れている。特に傾きが 20° の場合、4.の方法では、ずれがないときであっても誤差を1 mm以内に抑えることはできないが、本方法では $-3 \sim 3$ mm程度のずれであれば、誤差を1 mm以内に抑えることができる。

<6.2> センサの特性変動の影響 計測システムを作成する場合、すべてのセンサの距離-出力特性が同一であ

図8 センサの特性変動の影響
Fig.8. Detection errors caused by changes in characteristics of sensors. (a) position (x,y), (b) angle A. Solid lines correspond to the arrangement (II) and dashed ones to the case of (I) in Fig.4.
($|z - c_z| = 100$ mm, $D = 60$ mm, $Z_g = 0$ mm,
($\theta_x, \theta_y, \theta_z = (90, 80, 10)$ [deg]).

ることが望ましいが、実際面では実現が困難である。このためセンサ間の特性変動が検出精度に及ぼす影響について考察しておくことが必要であり、シミュレーション実験により検討した。

本システムでは、(1)式に基づく距離-出力特性の理論式を用いて、実測値との標準偏差 (ΔV) が最小になるように近似したものをセンサ特性として採用している⁽⁵⁾。センサ特性の変動は、この近似精度を $m \cdot \Delta V$ で表現したときの m をパラメータとして検討した。

図8 (a), (b) は、磁石のずれがない ($Z_g = 0$ mm) 場合の位置および角度の検出誤差をそれぞれ示したもので、実線が両側にセンサを配置 (センサ8個) したとき、破線が片側のみに配置 (4個) したときである。なお、いずれの場合も磁石の傾きが、 $\theta_z = 10^\circ$, $\theta_x = 90^\circ$, $\theta_y = 80^\circ$ のときを例にとり、簡単のためにすべてのセンサに一樣な特性変動が生じる場合を仮定している。

図に示すように、係数 m の増加に伴い検出誤差はほぼ直線的に増加しているが、両検出方法による誤差の違いは顕著である。ここでは、ずれのない場合 ($Z_g = 0$ mm) の例を

図9 位置検出精度
Fig.9. Empirical calibration patterns of the measuring system with the sensor arrangement (II) in Fig.4.

示したが、ずれが生じる場合の両検出方法の違いは一般に更に拡大する傾向にある。

これらのことから、センサの特性変動やノイズの影響を考慮してセンサを頬の両側に配置する方が望ましく、この方法は実用上有効である。

7. 実験例

<7.1> 検出精度 図9は先に述べたシミュレーション結果に基づき、実際に頬の両側にセンサ8個を配置して校正を行った場合の位置検出精度を示している。点線で結ばれた格子点が理論的な磁石位置を示しており、実線で結ばれた格子点が8個のセンサを用いて検出された磁石位置を表す実験値である。破線で示す60 mm×60 mmの評価領域内において、これら格子点間の距離誤差の標準偏差として定義した位置検出精度は0.64 mmであった。誤差は主に領域上部で生じているので領域中央部での誤差は更に小さい。また、理論値における磁石の磁軸を基準として、実験値における磁軸のずれを角度検出誤差として定義したときの標準偏差は0.22°であり、調音運動の計測には実用的な精度である。

<7.2> 舌の調音運動の計測実験例 センサを頬の両側に配置して、発話中の舌の運動計測を行った。実験では成人男性1名を被験者とし、磁石ベレット (直径2 mm, 長さ10 mm, 希土類サマリウムコバルト系磁石) を舌尖から後方約25 mmの舌面に取り付けた。

図10は日本語音の (a) [etete] および (b) [edede] の計測結果を示している。図では、上から水平 (H)、垂直 (V) の各運動成分の変位、速度 (VEL)、傾き (A , A_y , A_x) および音声波形 (包絡) の、それぞれの時間変化パターンを3回の発話につき重ねて表示している。なお、発話ごとの位置と傾きは、顎を閉じ舌を軽く硬口蓋に付け

図10 発話 (a)[e t e t e], (b)[e d e d e] における舌の調音運動の計測例

Fig.10. Movement time patterns of the tongue point movement during utterances of (a)[e t e t e] and (b)[e d e d e].

た状態, すなわち休止状態における値 (位置については+印, 傾きについてはRef. で示す。)を基準として表示している。また, それらの時間的な整合は音声波形上に矢印で示した時刻ととっている。

両検査語における磁石の位置変化パターンは類似したものとなっているが, 子音[t]および[d]調音時において垂直方向の運動パターンに違いが認められる。すなわち, 子音[t]調音時の磁石位置は[d]におけるものよりも休止位置(+)に近くっており, 舌と硬口蓋とがより完全な閉鎖を形成していることが推察される。これは以前の計測実験においても観察された傾向である⁽¹³⁾。

また, 傾き変化パターンでは, いずれの検査語についても, A_y が発話中, 休止状態付近で変動しているのに対し, A_x は発話開始直後の変化が著しい。すなわち, 舌を被験者側から見た場合, 磁石は右下がりの傾き変化を生じており, 舌表面が主に垂直方向に変形していることが推察される(図5参照)。今回の計測実験では, 検査語の種類によっては 20° に近い傾きを生じる例も見られたが, 平均して 10° 程度の変動が観察された。

8. むすび

本論文では, センサを頬の両側に配置して磁石の位置と傾きを検出することにより, これまで問題となっていた磁石のずれや傾きによる検出誤差を軽減できることを示した。

また, この方法はセンサの特性変動の影響を軽減するうえでも有効であることが明らかになった。誤差の軽減としてだけでなく, 計測点付近の舌表面の変形状態を知る手がかりとして, この方法による傾きの検出は興味深い。

発話中の磁石の移動距離は矢状断面(頭部中央を垂直に左右に分ける断面)上でただかだか30mmであり, 磁石のずれは舌を意図的に動かさない限りはあまり大きくないと思われる。また, 磁石の取り付け時にも十分に注意を払えば, ずれは数mmと思われるので, 本方法による誤差軽減の効果は高く有効な方法である。

これまでに行った計測実験およびデータの解析処理結果を踏まえて, 引き続き多点の計測処理システムの開発を行っている。

アモルファス磁性線は(株)ユニチカから提供されたものである。また本研究の一部は立石科学技術振興財団の援助によることを記し謝意を表する。データの処理に協力いただいた本研究室 陳一兵, 麻生薫の両君に感謝する。

(平成5年7月15日受付)

文 献

- (1) M. Sawashima and F. S. Cooper (Eds.): "Dynamic Aspects of Speech Production", University of Tokyo Press (1977)
- (2) J. S. Perkell: "Physiology of Speech Production: Results

and Implications of a Quantitative Cineradiographic Study", Research Monograph No.53, MIT Press (1969)

- (3) Y. Sonoda: "Observation of tongue movements employing magnetometer sensor", IEEE Trans. Magn., **MAG-10**, 3, 954~957 (1974)
- (4) 園田頼信・緒方公一: 「磁気センサによる舌の調音運動の計測」, 電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-90-176**, 93~102 (平2)
- (5) 園田頼信・緒方公一: 「磁気センサを用いた調音運動の計測システム」, 信学論 (A), **J76-A**, 1, 9~17 (平5)
- (6) K. Harada, Y. Kozima, Y. Fujii and S. Takeuchi: "Measurements of blast furnace inner-state by magnetometer", IEEE Trans. Magn., **MAG-16**, 5, 698~700 (1980)
- (7) K. Mohri, K. Kasai, T. Kondo, H. Fujiwara and M. Matsumoto: "Magnetometers using two amorphous core multivibrator bridge", IEEE Trans. Magn., **MAG-19**, 5, 2142~2144 (1983)
- (8) B. Tuller, S. Shao, and J. A. S. Kelso: "An evaluation of an alternating magnetic field device for monitoring tongue movements", J. Acoust. Soc. Am., **88** (2), 674~679 (1990)
- (9) J. S. Perkell, M. H. Cohen, M. A. Svirsky, M. L. Matthies, I. Garabieta and M. T. T. Jackson: "Electromagnetic midsagittal articulometer systems for

transducing speech articulatory movements", J. Acoust. Soc. Am., **92** (6), 3078~3096, December 1992

- (10) 緒方公一・園田頼信: 「発話時の舌ベレットの傾き検出」, 信学技報, **SP91-123**, 9~16 (平4)
- (11) 緒方公一・園田頼信: 「磁気センサによる調音運動の計測—舌ベレットの傾きとずれを考慮したセンサ配置—」, 信学技報, **SP92-140**, 25~32 (平5)
- (12) 伊理正夫: 数値計算 (昭56) 朝倉書店
- (13) 園田頼信: 「日本語の発話時における舌および下顎の運動特性」, 信学論(A), **J62-A**, 9, 555~562 (昭54)

緒方 公一

(学生員) 昭和42年2月3日生。平成元年熊本大学工学部電子工学科卒業。平成3年同大学大学院修士課程終了。現在、同大学大学院博士課程在学中。この間、調音器官の運動計測とその運動解析に関する研究に従事。電子情報通信学会、日本音響学会各会員。

園田 頼信

(正員) 昭和16年5月26日生。昭和39年熊本大学工学部電気工学科卒業。昭和41年九州大学大学院修士課程終了。同年同大学助手。昭和48年熊本大学講師。現在、同大学教授。工学博士。音声科学、画像処理等の研究に従事。電子情報通信学会、日本音響学会、IEEE各会員。