

<平成24年度助成>

歯根膜内の受容器特性にもとづく食感センサと 3次元咀嚼運動機構による食感計測に関する研究

中本裕之

(神戸大学 大学院システム情報学研究科)

緒言

食物を咀嚼し摂取することは、我々ヒトにおいて生命・健康の維持に必要な不可欠な行為であり、その過程で我々は主に3つの刺激を知覚している。そのうち2つは食物の風味として重要な要素である味と香りであり、それぞれ味覚と嗅覚で知覚される。他1つは歯と食物間に発生する物理的関係である食感である。パリパリやシコシコなど食感の表現は無数に存在し、味と香りに劣らず食物に対する食感評価の重要性は高い。この食感評価の手段として、測定機器を用いた食感の定量化は被験者実験に比べて厳密な比較検討が可能となる。しかし、測定機器による測定方法は1軸方向から食品を押すことでその反力を測定するが、ヒトが食感を感じるとき歯は歯根膜によって3軸方向に変位していることから、機器による測定でも定量化が十分であるとは言えない。先行研究では、食感を咀嚼時の音響解析や、食品の構成物質をスペクトル解析によって評価するものがある^{1,2)}。しかしながら、いずれもヒトが食感を圧力で感じていると仮定しているのに対して歯の構造を測定機器の検出部に反映させた食感評価方法の研究は十分になされていない。

そこで本研究では、食感センサ及び咀嚼運動の両者を改善した新たな食感計測システムの開発を目的とする。このシステムの特徴は大きく2点からなる。1点は、食物と歯の間に発生する3次元の力と歯に生じる微小3次元変位を計測可能な新たな食感センサを開発する点であり、この点に

よって1次元計測の市販機器に対して高い独自性を有することができる。他1点は、精密な軌道を生成する3次元駆動システムを製作し、その駆動システムによって食感センサの位置や姿勢を変化させる3次元咀嚼運動を実現する。3次元変位の計測の可能な食感センサと3次元運動の可能な駆動系の融合により、咀嚼に近い状態で食感の計測が可能なシステムを実現する。

ヒトの歯の構造

ヒトの歯の構造を図1に示す。歯は表面からエナメル質、象牙質、歯髄の3層構造である。エナメル質は、歯冠部(歯の頭の部分)をおおう人体の中で最も硬い組織であり、いったん崩壊してしまうと再生能力がないため自然治癒ができない。したがって、加齢とともにすり減る傾向がある。象牙質は、エナメル質の下の層にある組織であり、エナメル質より柔らかく刺激が加わると痛みを感じる。エナメル質と違い、象牙質は歯髄側では僅かに再生能力があり、歯髄を保護するように働く。歯髄には、神経線維のほか小動脈及び小静脈の毛細血管やリンパ管を含んでおり、痛覚をもつ。

歯周組織には、セメント質、歯槽骨、歯根膜がある。セメント質は、歯根の周りを覆うように取り囲んでいる柔らかい組織である。セメント芽細胞により生成され、歯根膜と呼ばれる結合組織をつなぎとめる役割をする。歯槽骨は、歯根を支えている骨であり、この歯槽骨が吸収し(溶け)減少する病気が歯周病である。

歯根膜は、歯と歯槽骨の間にある厚さ0.2～

0.3mmほどの薄い膜で、歯と歯の周囲の骨を結びつけ、歯を支えるコラーゲン線維の堅固で弾力性に富む結合組織である。歯周靭帯とも呼ばれる。歯根膜には歯を歯槽骨に固定する役割と、負荷がかかった際の衝撃を和らげる働きがある。一方がセメント質、他方が歯槽骨に埋め込まれている。埋め込まれた末端部分はシャープ線維と呼ばれる線維組織である。歯根膜は、歯根と歯槽骨をつなぎとめながらクッションのような働きをする他、感覚受容器としても働き、組織内に分布する豊富な知覚受容器によって、口腔内組織の働きを制御している。いわゆる食感はこの歯根膜内の受容器によって知覚されている^{3,4)}。

歯と歯周組織は以上のような構造と関係にあるが、食感の検出部に当たるのは歯根と歯槽骨の間のクッションである歯根膜である。歯根膜は筋線維と血管から成る器官で、筋線維内には多くの触圧神経が内包されており、圧力がかかると伸縮しヒトは圧力を知覚している。歯根膜の伸縮によって歯は3軸方向に変位していると考えられる。

以上のことから、歯根膜に相当する柔軟な素材を食感センサが有すること、またその柔軟性によって生じた歯の変位を知覚していることが分かる。次節においてこれらのことを反映させた食感センサを設計する。

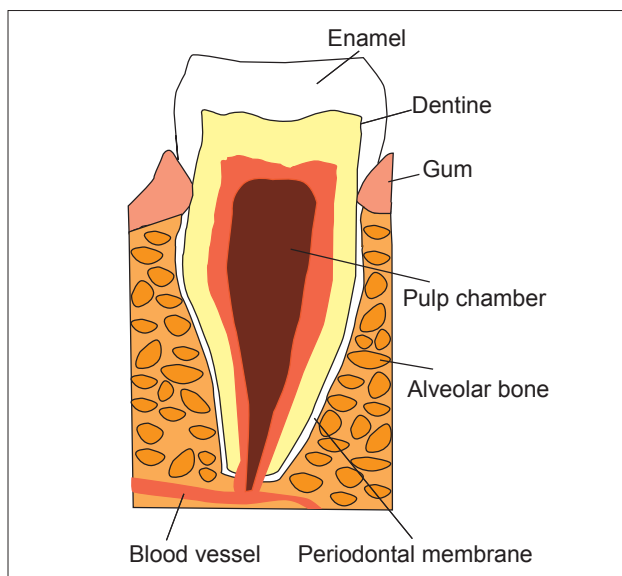


図1 ヒトの歯の構造

食感センサ

1) 原理

ヒトは物を噛んだ圧力を歯が動揺することで感知している。歯は、歯と歯槽骨の間にある歯根膜が伸縮することで変位する。歯が動揺する範囲は前節で述べた通り非常に小さいため、歯に相当するプランジャの変位のレンジは小さくする。また、歯根膜は歯根部位を覆うようになっているため歯は3軸方向に変位する。このことから、3次元でなおかつ限定的な変位のレンジを持つプランジャを作成する必要がある。以下に食感センサとして要求される条件を挙げる。

- ・ 3軸方向に変位すること
- ・ 歯根膜に相当する弾性体をもつこと
- ・ 食品を押し込んでも破損の無い強度を有すること
- ・ 繰り返しの使用に耐えるよう弾性体内に配線をもたないこと
- ・ 3軸方向の変位を測定できること

これらの条件を満たすには、0.2mm程度の変位の計測が可能であり、配線の不要な計測原理を用いる必要がある。そこで本研究では磁石の発生する磁界強度を巨大磁気抵抗効果(GMR: Giant Magnetoresistive effect)を利用したGMR素子で計測することを計測原理として、高感度かつ無線となるセンサの構成を設計した。

図2に動作原理を示す。食感センサは、歯、歯槽骨、歯根膜に相当するそれぞれプランジャ、ベース、エラストマ層を有している。プランジャは磁石を内蔵する。このプランジャに食物が接触すると3軸の力が作用しプランジャが変位する。この変位は柔軟膜が非常に薄いことから3軸の並進と仮定する。ベースの下部には電子回路の基板が接着されており、その基板にGMR素子とコイル素子であるインダクタの2種類の素子が配置されている。プランジャに力が作用してもベースは変位

しないことから、プランジャとその内部に固定された磁石の変位によってGMR素子とインダクタが受ける磁石の発生する磁界強度が変化する。この変化にもとづいてプランジャの変位を算出し振動を検出することで食感センサの出力とする。

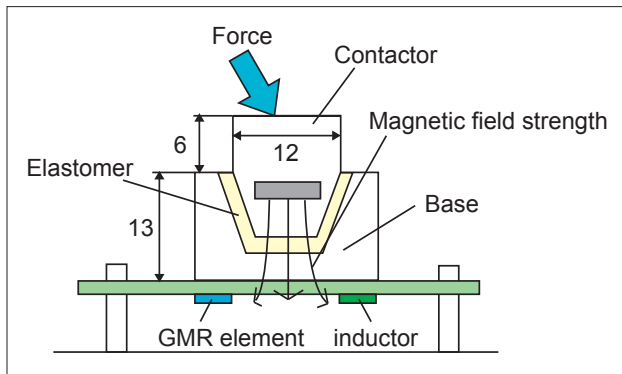


図2 食感センサの構造と原理

2) 設計

食感センサの計測原理は、磁界強度の変化からプランジャの3軸の変位を算出することである。したがって、磁界強度の変化に対して方向の異なる軸の計測が必要である。3軸の情報を復元するのであれば、3つのGMR素子があれば良いと考えられるが、変位によって感度や精度に偏りが生じることを防ぐため、4つのGMR素子を回路基板上で円状に配置することとした。同様にインダクタも4つを配置した。その配置図を図3に示す。図3はプランジャとベースのある面と反対の回路基板の面を示す。半径10mmの円に内接する位置にGMR素子とインダクタを配置し、GMR素子は円の半径方向に感度軸をもちその方向の磁界強度を計測する。インダクタは方向性を持たず、磁界強度の変化の大きさに対して出力を変化させる。これら素子は樹脂等のモールドによる防水が可能のため、水分のあるような食物の計測も可能である。回路基板の大きさは40mm角であるが、コネクタを介してすべての素子の出力を取り出すため一方が55mmの長さをもつ。図2で示したように、プランジャは円錐台を逆にした形状をしており、食物と接触する面の直径は

12mmである。プランジャの内部には厚さ1mm、直径6mmの円柱磁石が固定されている。歯根膜に相当するエラストマ層はウレタンを充填、固化して製作され、その厚さは3mm、アスカーC硬度は15である。ベースの直径は26mmの円形であり、中央にプランジャを受けるための円錐台をくりぬいた形状のくぼみがある。製作を容易にするため、プランジャのサイズはヒトの臼歯の2倍程度とした。

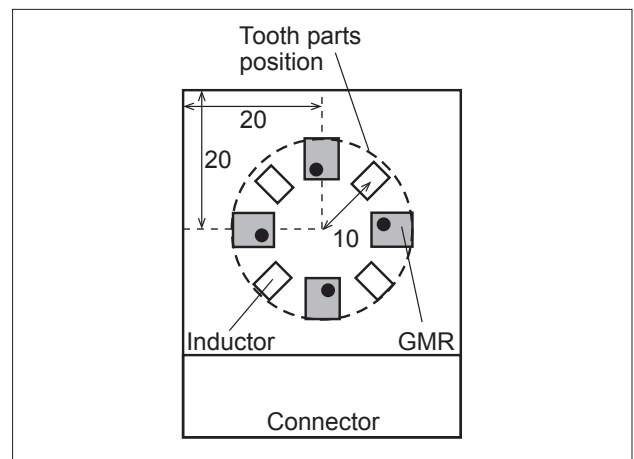


図3 食感センサ基板上の部品配置

3) 製作

食感センサの部品の中で硬度が必要なのはプランジャとベースである。これらは図2で示したサイズと形状であるが、本研究では3次元造形機を用いてABS樹脂の積層整形により製作した。プランジャは歯冠部分と歯根部分の2つに分けて製作し、中に磁石を入れて接着し固定させた。次に、ベースのくぼみの中心とプランジャの中心を合せた後、両者の隙間にウレタンを流し込み固化させた。ウレタンが固化した後、プランジャとベースの位置合わせに使用する部分をプランジャから切断し、ベースの底面を電子基板に固定することで食感センサを製作した。製作したセンサを図4に示す。図4の白い部分がプランジャとベース、エラストマ層であり、その下に回路基板がある。回路基板の片端にはプラグのコネクタがある。

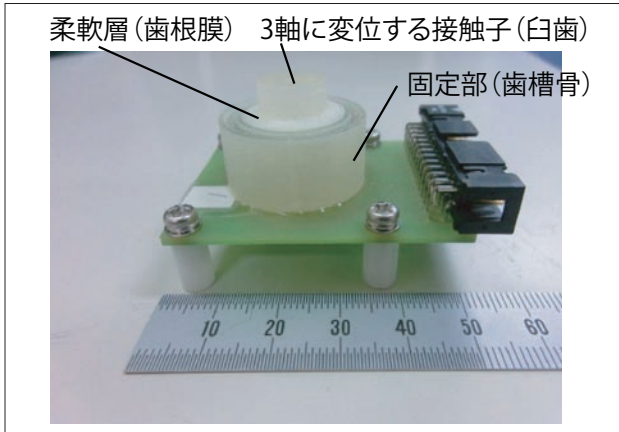


図4 食感センサ

4) 計測システム

食感センサの計測システムは、図4で示した食感センサと各素子の出力を増幅するための回路、増幅した電圧を計測するためのAD変換ボード（CONTEC社製、AIO-161601UE3-PE）とコンピュータから成る。GMR素子の出力は差動電圧であり、数十 mV の大きさがあるため、32倍の増幅率で増幅しAD変換ボードへと入力する。インダクタは一端をグラウンドに接続し、他端を増幅回路の入力端に接続する。インダクタの出力は微小であるため増幅率は10000倍とした。これら増幅回路は、計装アンプを使用し8個の素子の同時増幅が可能よう独自の回路基板を製作した。また、各素子の出力はAD変換ボードの入力までは特に遅れなく増幅・伝達されるため、サンプリング周波数はAD変換ボードの機能に依存する。本研究では10 kHzの周波数までの計測が可能であることを予備実験により確認した。

5) 校正

食感センサの4個のGMR素子の出力電圧から変位を算出する方法について述べる。これまで著者らの研究において、磁石の微小変位はGMR素子の出力の2乗に反比例することが明らかとなっている⁵⁾。この特性にもとづいて式(1)のような校正式を用いて3軸の変位を求める。式(1)の v_i ($i = 1, \dots, 4$) は各GMR素子の出力電圧を表し

ており、 C_{dxj} , C_{dyj} , C_{dzj} ($j = 1, \dots, 9$) は校正行列 C の要素を表す。また、 Δx , Δy , Δz は3軸方向の変位を表す。校正行列 C の各要素は既知の出力電圧と変位の組み合わせを用いて最小二乗法による重回帰分析で決定する。一度校正行列を決定することで計測時は単純な計算で変位を算出することが可能であり、リアルタイムに食感センサの出力を確認する用途にも対応が可能である。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = CV$$

$$= \begin{bmatrix} C_{dx1} & \cdots & C_{dx9} \\ C_{dy1} & \cdots & C_{dy9} \\ C_{dz1} & \cdots & C_{dz9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1/v_1^2 \\ 1/v_1 \\ \vdots \\ 1/v_4^2 \\ 1/v_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

6) 基礎評価

変位の計測の基礎評価を行った。校正した食感センサを次節で述べる3次元駆動システムに固定し次に示す範囲の変位を0.5mm刻みで与えた。

$$-1.0 \leq x, y \leq 1.0$$

$$-1.0 \leq z \leq -0.5$$

与えた変位は、 $5 \times 5 \times 2 = 50$ 通りとなる。 $z = -1$ における xy 平面上の結果を図5、 xz 平面の結果を図6に示す。

この評価における変位の最大誤差は0.22mmで、変位のレンジの2mmの10%程度である。 xy 平面上と xz 平面上ともに、原点付近の位置の誤差に比べ原点から距離が大きくなるにつれて誤差が大きく精度が低い傾向にあることが分かる。この傾向の原因としては、プランジャが変位だけでなく微小回転を生じたためと考えられる。ただし、食物を押し付ける実験においては、原点まわりのあまり変位の小さなレンジを主に使用すると考えられ、3軸の ± 0.5 mmの範囲内における最大誤差は0.18mmとレンジの10%に収まっていることから実用上は問題無いと考えられる。

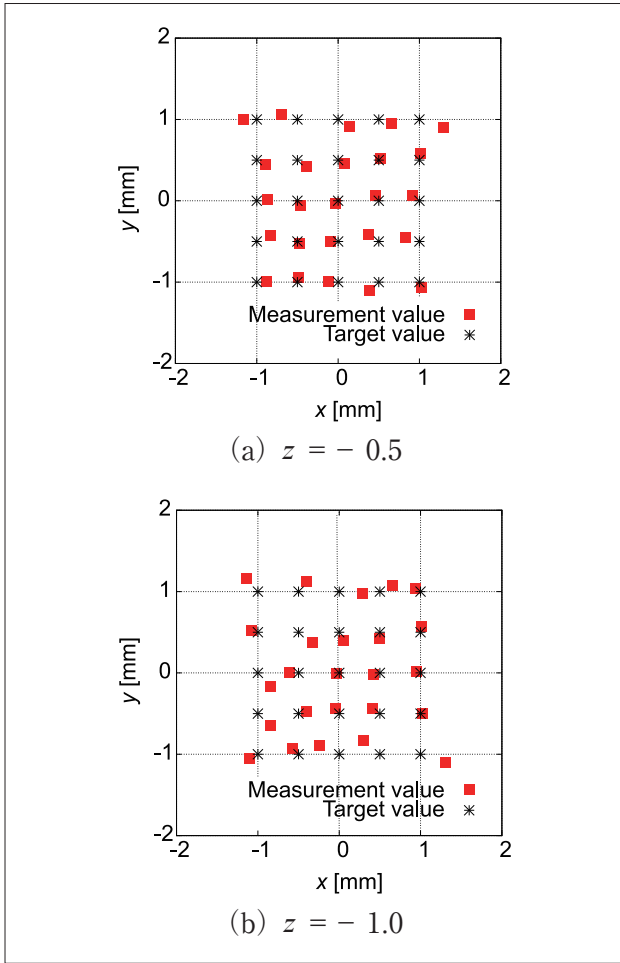


図5 xy平面上の計測した変位と目標値

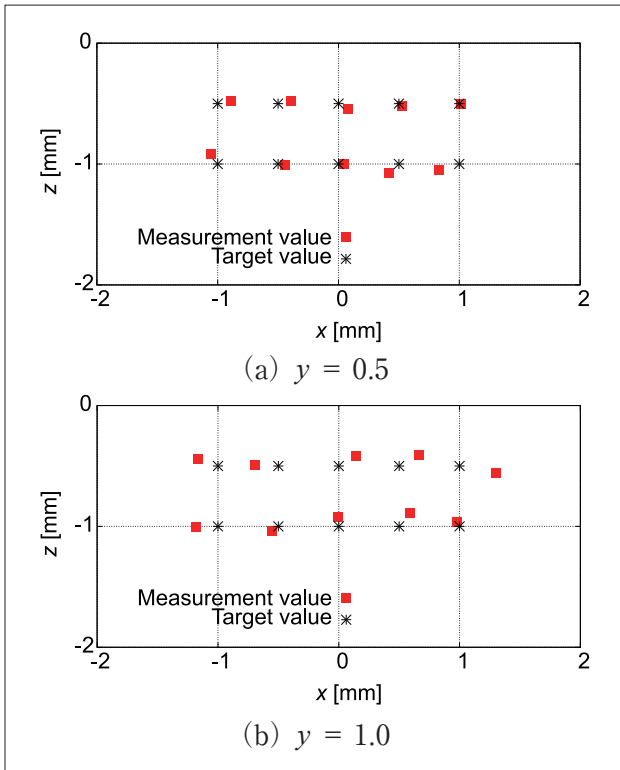


図6 xz平面上の計測した変位と目標値

3次元駆動システム

3軸の変位の計測の可能な食感センサを製作したが、駆動機構が1軸ではその有効性を活用することができない。そこで3軸方向の咀嚼運動を模擬することができる駆動機構を設計した。駆動機構は大きな力を発生することができる平行リンク機構⁶⁾での事例があるが、生成できる運動のレンジが小さいため、本研究ではボールねじを用いたスライダ機構を採用した。ボールねじを用いることで高い剛性を、またアクチュエータにステッピングモータを用いることで高い精密さを実現する。2軸方向に動作するXYスライダ(シグマ光機製、SGSP33-200(XY))にz軸スライダ(シグマ光機製、SGSP33-200(Z))を組み合わせ、3軸の駆動システムを構成した。その駆動システムを図7に示す。図7では、接触子が下に向くように食感センサが固定されており、x軸とy軸のボールねじがみえる。各軸の最大移動速度は20 mm/secであり、一般に食感の計測に用いられている計測機器の最大移動速度が10 mm/secであることと比較すると2倍の速度である⁶⁾。また、繰り返し位置決め精度は0.01 mm以下である。

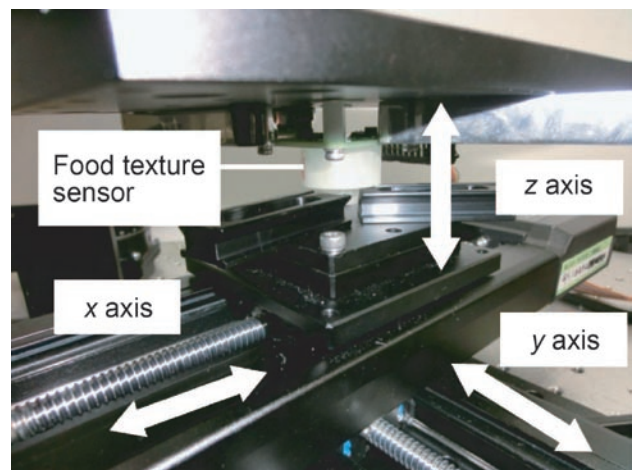


図7 3次元駆動システム

実験

食感センサと3次元駆動システムを用いて実験を行った。ただしここでは、食物からの反力が

3軸方向に生じることを確認するため、3次元駆動システムの2軸を固定し、押し込み方向(z軸)のみの動作をさせ破断実験を行った。試料としてスナック菓子を用いて7.5 mm/secで食感センサを押し込んだ場合の3軸の変位とインダクタの出力を計測した。その結果を図8に示す。図8では約380 msecでインダクタの出力が一度大きくなっている。これは試料と食感センサが接触した瞬間を示している。その後、各軸の徐々に変位が大きくなりx軸では正方向、y軸では負の方向、に大きくなっている。そして約840 msecで各軸の変位の絶対値が小さくなるとともにインダクタの出力が再度大きくなっており、これは破断の瞬間を示している。このようにスナック菓子の破断させる際にエラストマ層の存在によってプランジャが

3軸方向に変位しそれを計測可能なこと、破断の瞬間が計測可能なことが明らかとなった。

食感センサと3次元駆動システムを用いて凝集性の計測評価を行った。直径15 mmの市販のウィンナーに対して、3次元駆動システムで3 mmの押し込みを2回繰り返したときの食感センサのz軸方向の変位を計測した。テクスチュロメータを用いた凝集性の評価では歪みと応力のデータを用いて行うが、エラストマ層が弾性体であると仮定できる場合は変位と応力が比例すると考えられることから、先の実験と同様にz軸の変位を対象とした。結果を図9に示す。図9の横軸が移動したz軸の歪みを示しており2回目の歪みに対する変位が1回目と比較して小さくなっていることが分かる。一般にウィンナーのような食品はこのよ

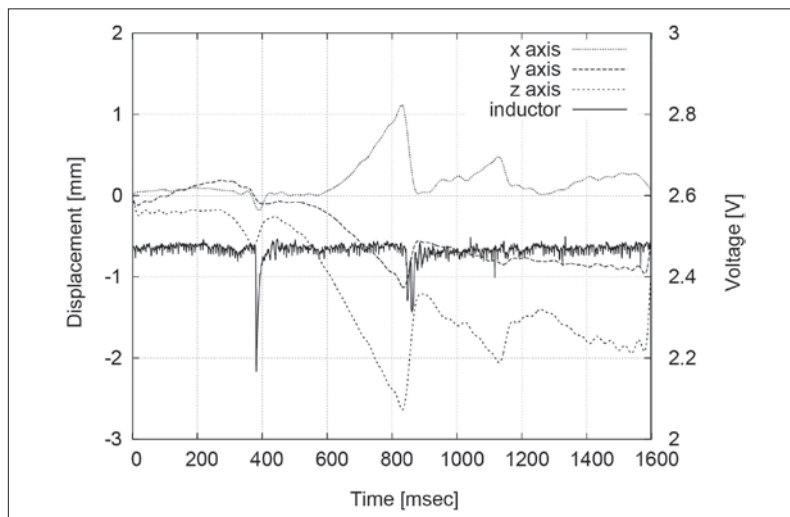


図8 スナック菓子を押しつぶした際の3軸変位とインダクタの出力電圧

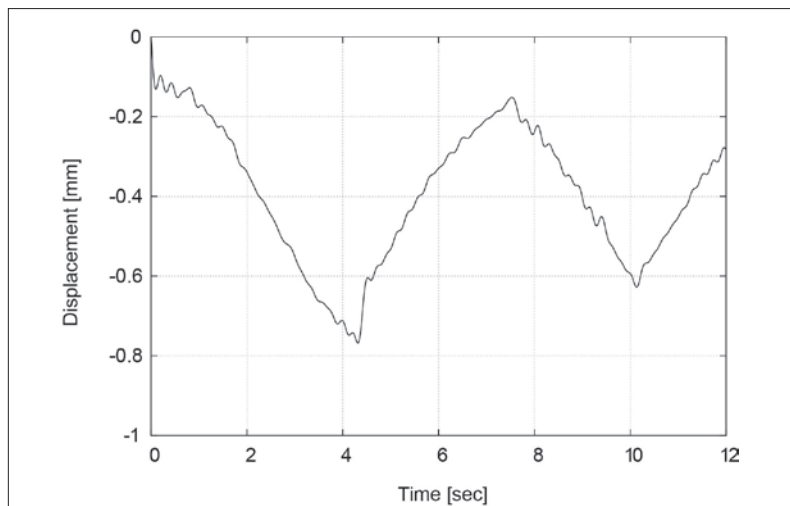


図9 ウィンナーを2回、3mmだけ押下した際のz軸の変位

うな凝集性を有しているとされており、この結果から食感センサと駆動システムが凝集性を評価可能であることが明らかとなった。

ヒトの咀嚼軌道

3次元駆動システムは x, y, z の3軸方向へ動作することができるため、3次元的な咀嚼運動を生成することが可能である。そこで本研究では3次元駆動システムによって咀嚼運動を生成することを目的として、ヒトの咀嚼軌道を計測した。被験者にチューイングガムを咀嚼させ、そのときの鼻先と顎先の3次元座標をモーションキャプチャシステム (NaturalPoint 社製、OptiTrack) で取得した。2周期分の鼻先に対する相対的な顎先の軌道を図10に示す。顔の正面に対して顎が上下する方向を横の方向を lengthwise direction、それと直角の横方向を lateral direction とした。顔の奥行き方向は変位量が小さいため本報告書では省略する。顎が上下する方向には約10mmの変位があり、左右の方向には約6mmの変位となった。被験者により顎が変位する方向が異なる場合があるが、変位量としては上下方向が大きく、左右方向は上下に比べて小さい。顎の運動は周期的であるが、ガムを咀嚼した場合は大きな円形の軌道ではなく、細長い楕円軌道あるいは直線的な軌道であ

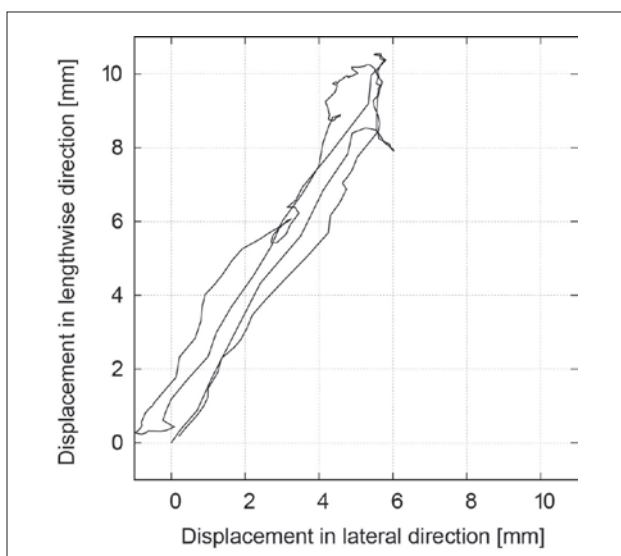


図10 ガム咀嚼時の顎の軌道 (顔正面に対して横軸は顔の幅方向、縦軸は顔の長さ方向)

ると捉えることができる。このことは、食物を評価する際に一方向 (垂直方向) からの押し込みだけでは、ヒトが歯で知覚している応力が十分に評価できていない可能性があることを示唆する。さらに咀嚼運動はあらかじめ決められた一定の軌道ではなく、口腔反射を受けながら軌道を調整しているとの報告もあるため^{4,7)}、フィードバック制御系を3次元駆動システムに組み込む必要がある。これらのシステムへの反映は、今後の課題として研究を推進したい。

結 言

ヒトの歯の構造にもとづいて歯根膜に相当するエラストマ層をもつ食感センサと3軸に動作が可能な3次元駆動システムを開発した。食物に対して垂直方向の押し付けと計測が主である市販の食感計測機器に対し、食感センサのプランジャはエラストマ層の動く範囲において3軸方向に変位し、その変位によって食物から受ける力の方向や大きさを推測することができる。食感センサの各軸の変位の精度は動作レンジの約10%であった。また、3次元駆動システムは市販の機器に対し2倍の速度である20m/secでの動作が可能であり、ヒトの咀嚼の円軌道の再現も可能である。破断実験及び凝集性の評価実験により開発したセンサとシステムの有効性を検証した。

食感センサでは3軸の変位を計測可能であることを示したが、その有効性はまだ十分に示せていない。例えばこの食感センサでしか計測しえない食物を対象として実験を実施し提案するシステムの有効性を訴えたい。3次元駆動システムの動作速度について、衣松らが報告している人の咀嚼速度が最大100mm/secであることに対してはまだ不十分であるといえる⁸⁾。この移動速度については今後研究を進める過程において必要に応じて改良したい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多大な研究助成を賜りました(公財)浦上食品・食文化振興財団、ならびに関係の皆様には厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 安藤繁, 理解と工夫から新しい創造を No.2 耳で味わう食感～サクサク感～, SHINKAWA Times, http://www.shinkawa.co.jp/times/column/s-andou/vol14_column_profas.html.
- 2) 中野有加, 櫻井直樹, 藤路陽, 堀江秀樹, 中野明正, 鈴木克己, 弾性指標を用いたスライストマトの果肉硬度の非破壊評価(栽培管理・作型), 園芸学研究, 7(4), pp. 543-547(2008).
- 3) 福田麻利子, ヒト抜去歯付着歯根膜の感覚神経終末の分布 - 特に第一小白歯および第三大白歯について -, 歯科学報, 94(7), pp. 575-587(1994).
- 4) 前田健康, 原田史子, 歯根膜ルフィニ神経終末の再生・発生過程, Niigata Dent. J., 33(2), pp. 1 - 15(2003).
- 5) 伍賀正典, 中本裕之, 武縄悟, 貴田恭旭, 磁気式触覚センサの小型化と性能評価, 日本機械学会誌(C編), 76(772), pp. 3640-3647(2010).
- 6) 高信英明, 正田耕一郎, 高西淳夫, 柳沢幸江, 食物物性計測・評価ロボット(テクスチュロボット)の開発, 日本咀嚼学会雑誌, 11(1), pp. 21-28(2001).
- 7) 日塔睦雄, 遠藤義樹, 児玉厚三, 虫本栄子, 田中久敏, Single dentureにおける粘膜および歯根膜感覚の役割, 日本顎口腔機能学会, 下顎運動機能とEMG 論文集, 11, pp. 179-186(1992).
- 8) 衣松令恵, 道脇幸博, 横山美加, 道健一, 高橋智子, 大越ひろ, ヒトの咀嚼を考慮した食物の分類に関する研究: 第一報 物性測定システムの開発, 日本口腔科学会雑誌, 51(1), pp. 35-42(2002).

Texture measurement by using food texture sensor based on characteristics of receptor in periodontal membrane and three-axis manducation motion system

Hiroyuki Nakamoto

Graduate School of System Informatics, Kobe University

Manducations and ingestions of food are necessary to preserve our life and health. In the manducations, we perceive three stimuli: taste, smell and food texture. The food texture is a physical relationship between teeth and food. Many expressions of food texture imply their importance. Good designs of food texture contribute marketable foods. In general, measurements of properties of food texture use food texture instruments. The instruments give pressure to food in an only one-direction motion. The sensor is a load cell that measures unidirectional stress. The measurements using the instruments are not enough for evaluations of food texture. The evaluations require much and various data in pressing food. Therefore, we need to develop a novel sensor of food texture and a multi-axis motion system.

In this study, we propose a food texture sensor based on characteristics of receptor in periodontal membrane. The food texture sensor has the same structure of human grinding tooth, and measures three-axis displacement and vibration of its tooth parts. The food texture sensor is confirmed to measure the displacement with an error of 10%. The three-axis manducation motion system is composed of a combination of sliders driven by stepping motors. The manducation-motion system with the sensor is confirmed to measure responses of breaking tests of foods. In addition, a motion-capture system obtains trajectories of human manducations. We discuss the application of the trajectories to our manducation-motion system with the proposed sensor as the next step of our study.