

内97-32

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

咀嚼ロボットに関する研究

申 請 者

高信 英明

Hideaki Takanobu

機械工学専攻・生物制御研究

1997年12月

本論文では、人間の顎付近の構造と機能に似た上下顎機構と機能を有する機械システム（以下、咀嚼ロボットと呼ぶ）を構築し、実際の食物を破砕する咀嚼機能を実現するための方法論について論じた。

本論文では「咀嚼」を辞書にならって「かみくだくこと」と定義する。したがって咀嚼運動の本質は食物を口腔内に入れた後にいかに破砕し、嚥下に適した食塊へ変形させるかという下顎運動そのものに集約される。

咀嚼に関しては歯科医学分野を中心とした膨大な治療と研究成果を基礎とした知見が得られている。定性的な顎運動記述法から始まり近年では機械的・電子的あるいは化学的計測方法を利用した定量的なデータ記述方法を用いた研究による詳細な知見の蓄積が進められている。本研究でもそれらの知見を基礎として実証的研究を展開することが有効であると考えられる。

歯科医学分野におけるヒトの咀嚼に関する知見は治療と研究の2側面を持つ。まず治療の面では患者の咬合状態を口腔外において再現するための咬合器に代表される器具が現在でも広く用いられており、その有効性は多くの事例により示されている。次に研究の面に関しては従来研究を大きく3種類の研究グループに分類することができる。本研究との関連を把握するために各グループの研究内容を概観する。第1のグループは咀嚼に関与するヒトの人体各器官の挙動を計測することに主眼を置くグループであり、咀嚼運動時の顎運動または咀嚼筋の筋電図を機械的または電氣的装置を用いて計測したデータを基礎としてヒトの咀嚼運動に関する数学モデル構築を目指す研究である。第2のグループは有限要素法などの工学的手段を駆使した計算に主眼を置くグループであり、計算機シミュレーションを手掛かりに顎骨あるいは咀嚼筋の数学モデル構築を試みる研究である。第3のグループは生体のある程度シミュレートした機械モデル構築に主眼を置くグループであり、顎骨または咀嚼筋を模擬した簡単な機構をもとに第1または第2グループの研究結果の妥当性を実験的に検討しようとする研究である。しかしながら第1の研究では豊富な計測データは得られているものの、顎運動と咀嚼筋との関係に関する統一見解は得られておらず、まったく反対の解釈をしている例もあるほどであり、咀嚼運動に関する客観的な法則の発見は一部を除いて非常に困難な状況である。特に被験者の個人差が統一見解構築への障壁になっている。第2の研究は歯科医学分野に限らず非常に多くの研究者によって精力的にデータの蓄積が進んでいる。現段階では数学的に記述し、数値的に構築した数学モデルの妥当性を検証する実証的手段を模索中であり、近年では本論文で述べるようなセンサとアクチュエータを有する機械システムに注目が集まっている。第3の研究で構築され、用いられている機構は上下顎の接触点である顎関節と歯牙に相当する部分または筋に相当する部分に位置・速度・力センサを備えていないために咀嚼運動を2次元のまたは断片的にシミュレートしているにとどまっており、咀嚼運動の本質であるかみしめ運動に関する総合的な機械モデルの構築には残念ながら

至っていないのが現状である。

すなわち従来研究で不足していたことは、咀嚼運動に関する客観的記述と総合的な機械モデル構築の2項目であると考えられる。

本研究はこのような現状に鑑み、ヒトの咀嚼に関する客観的記述として咀嚼運動に関する運動学モデルと力学モデルを構築し、次に構築したモデルに基づいて駆動力とセンサを有する総合的な機械モデルとしての咀嚼ロボットを構築することを目的とする。

本論文は全6章から構成される。以下に各章ごとの概要を述べることにより、本研究を概観する。

第1章は序論である。本研究は工学分野から咀嚼研究に取り組むことになるため、研究の動機づけおよび従来研究との関連を踏まえた導入部分が重要であると考えられる。そこでまず歯科医学分野を中心としておこなわれてきた咀嚼に関する従来研究を振り返り、咀嚼に関する研究の歴史的背景と研究方法の分類を述べた。次に従来からの研究方法では十分な記述が困難と考えられる研究領域を指摘することにより本研究の必要性和方針を示し、動機づけと導入とした。

第2章では、ヒトの咀嚼運動に関する歯科医学上の知見を述べた。歯科医学分野では咀嚼に関与する人体各器官を咀嚼システムという名称で呼んでいる。咀嚼システムは骨格・筋・感覚器・中枢神経という4種類のサブシステムに分割可能であり、各サブシステムが相互に作用しながら結果として円滑な咀嚼運動が発現していると考えられている。そこで本章では各サブシステムの構成要素と機能を述べることにより、第3章以降への助走とする。骨格サブシステムは上下顎から構成され、運動学的には4自由度として記述できる。ヒトの下顎は左右の顎関節を結ぶ仮想的な回転軸（全運動軸と呼ばれている）まわりに開閉口運動をしながら同時に前後運動をおこなっているという特徴的な運動形態を有する。筋サブシステムは咀嚼運動に寄与する筋のことであり、咬筋・側頭筋・外側翼突筋・内側翼突筋・開口筋群の5種類の筋の総称である。本章では解剖学分野で知られている各筋の起点・終点そして機能を述べた。感覚器サブシステムは咀嚼運動に関係する筋内の筋紡錘・腱器官、そして顎関節部分と歯根部分の力検出器のことである。筋紡錘は筋の変位と収縮速度を検出する位置・速度センサに相当し、腱器官は収縮力を検出する力センサに相当する。中枢神経サブシステムは前記した骨格・筋・感覚器の3サブシステムを統括し、咀嚼運動全体を司る機能を有している。

第3章では、咀嚼運動に関する客観的記述法として運動学と力学とを述べた。運動学ではまず顎運動を3自由度すなわち開閉口運動・前後運動・すりつぶし運動でモデル化し、各自由度のパラメータを定義した。逆運動学では下顎の切歯点（せっしてん：下顎の両前歯の間の点のこと）の座標を指定することにより、各咀嚼筋の変位を記述できることを示した。ここで下顎と咀嚼筋は一種の並列機構と考えることができ、並列機構に関する知見が本章での基礎となっている。力学

に関しては、下顎に作用する力を咀嚼筋の発生力とその他の力として記述した。その他の力には顎関節力と食物から顎に作用する咬合力が含まれる。

第4章では、第2章と第3章で記述した内容に基づいて設計した咀嚼ロボットシステムの内容を具体的に述べた。咀嚼ロボットはヒトの咀嚼システム構成に対応した4種類のサブシステムから構成される。骨格に相当するロボットの機構は開閉口運動・前後運動・すりつぶし運動が可能な3自由度とし、ヒトの場合4番目の自由度であるスラスト方向の自由度は微小であるためにロボットでは省略した。ヒトの全運動軸に相当する軸をロボットの下顎に装備し、この軸を左右の顎関節に相当するガイドに沿って前後移動させることによりヒトの顎運動を機構的にシミュレートした。筋に相当するロボットのアクチュエータはサーボモータにより下顎に取り付けたワイヤを巻き上げる構造とした。こうすることにより引っ張ることはできるが圧縮することはできないというヒトの筋の特性を具現化することができた。アクチュエータの配置に関してはヒトの咀嚼筋の解剖学的知見を基礎にしている。また、ヒトの筋は変位と発生張力とが非線形な関係にあることをシミュレートした機構も組み入れた。感覚器に相当するセンサは、筋紡錘に相当する変位センサと速度センサ、腱器官に相当する張力センサ、歯根膜に相当する圧力センサ、顎関節部分に相当する力センサがある。中枢神経系に相当するコンピュータは各センサからの情報を基にアクチュエータを駆動することにより、ロボットによる実際の食物の咀嚼運動を実現する。

第5章では、咀嚼ロボットの基礎特性実験を述べた。第2章と第4章で述べたように本ロボットはヒトの咀嚼システムをシミュレートした機構と機能を有していることが望ましい。そこで本章ではロボットのセンサおよびアクチュエータの各部分の基礎特性を計測することにより、本ロボットが実際の食物を咀嚼するに十分な機構と機能を有していることを確認する。

第6章では、本研究で得られた成果を要約した結論と今後の研究展望を述べている。

以上、本研究によりヒトの咀嚼運動に関する客観的記述としてのモデルを構築し、モデルを基礎とした実証機械としての機械モデルすなわち咀嚼ロボットを構築することができた。本研究で得られた咀嚼運動に関する記述と機械モデル構築方法を基礎とすることにより、今後の高齢化社会における顎口腔系に関する新しい研究領域といえる歯科用ロボット研究という実証的な研究領域に大きく寄与できるものと考えられる。