

(13)

顎運動シミュレータ JSN/1 D の開発と自律開閉口運動の制御

(新潟大学大学院) 林 豊彦, 田 中 澄江, 池 津 正人
(新潟工科大学) 中 嶋 新一
(新潟大学) 小 林 博, 山 田 好秋, 宮 川 道夫
(新潟大学名誉教授) 石 岡 靖

1. ま え が き

「H氏は朝食のとき奥歯が一本痛いのに気がついた。できるだけその歯で噛まないようにしても、仲々うまくいかない。気にしすぎると、今度は間違っ

って頬や舌を噛んでしまう。どちらにしても飛び上がるほど痛い。だから少しも食事がうまくない。今まではどうしてうまく食べられたのか、H氏は不思議に思った……」

このような経験、誰でも一度はしたことがあるはずである。ヒトが話したり、食べたり(咀嚼)、飲み込んだり(嚥下)、噛みついたりするとき、下顎は上顎に対して運動し、上下顎歯列間にはかみしめ力(咬合力)が発生する。その動作については、歩行などと同様、上のような事件でもない限り、普段意識することはない。咀嚼運動のとき、ヒトの顎システム(顎口腔系)は、食片を舌と頬を使って下顎臼歯部の咬み合わさる面(咬合面)に移動し、それを咬合力で粉碎、咬合面形状を利用して粉砕片を舌方向に押し出す。この一連の動作は、顎運動¹⁾、咬合力、咬合面形態²⁾を巧みに利用しているが、その詳しいメカニズムについてはほとんど明らかにされていない³⁾。単純な開閉口時の筋活動パターンすら、まだ意見の一致をみえていないのである⁴⁾。

顎口腔系の運動メカニズムを解明する1つの方法として、近年、ロボットによって下顎運動をシミュレートする方法が注目されている⁵⁻¹⁵⁾。解剖学、生理学からの伝統的アプローチに対して、この新しい

方法論は、ある制御メカニズムの可能性を、運動を実際に再現することにより検証するという方法論(analysis by synthesis)を採る。具体的には、次の3つのステップからなる：1) ヒトに近い構造と機能をもつシミュレータを構成する；2) 解剖学、生理学的知見に基づいて運動の制御仮説を立てる；3) 実際にシミュレートされた運動と実際の運動を比較し、制御仮説を検証する。この方法論は、解剖学や生理学の方法論も含んでいることから、従来のボトムアップ手法と新しいトップダウン手法を融合した複合的アプローチ¹⁶⁾といえる。

我々は、咀嚼運動における各咀嚼筋の機能とその制御メカニズムの解明を最終的な目標として、これまで自律顎運動シミュレータ JSN/1 を開発してきた¹⁰⁻¹⁵⁾。咀嚼運動は複雑な3次元運動であることから、当面の目標は、より単純な開閉口運動における筋機能の解析とし、それに必要な顎体部(歯列、顎関節)、筋アクチュエータ、制御機構などの各コンポーネントの開発を進めてきた。この論文は、側頭筋に相当するアクチュエータを追加した新しいシミュレータ JSN/1 D を用いて、開閉口運動における下顎位の制御メカニズムを解析することを目的とする。

2. ヒトの上下顎の筋骨格系と開閉口運動

本章では、下顎運動の理解に最低限必要とされる顎口腔系の解剖について簡単に述べる。図1に、下顎骨、顎関節と咀嚼筋の配置を示す。

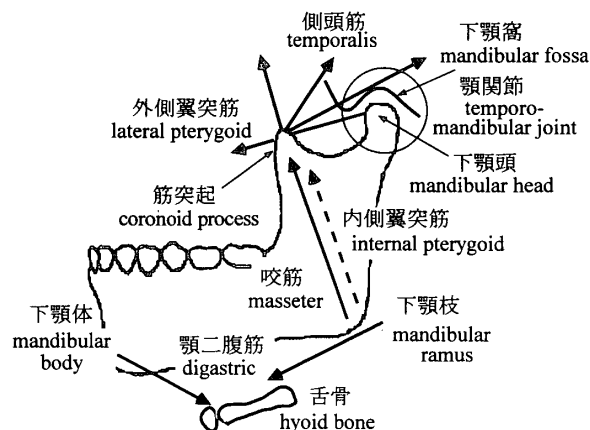


図 1 顎骨と下顎運動に関与する主要な筋群

下顎骨は歯列とそれを支える馬蹄形の下顎体、および後方部の下顎枝からなる。下顎枝はさらに筋突起と関節突起からなり、関節突起の下顎頭は側頭骨下顎窩と顎関節を構成する。

下顎を駆動する主な筋は、咀嚼筋と呼ばれる下顎骨と頭蓋骨間に付着する比較的強大な筋群と、舌骨上筋と呼ばれる舌骨と下顎・頭蓋間に張る筋群からなる。

咀嚼筋は、咬筋、側頭筋、外側翼突筋、内側翼突筋からなる。咬筋は頬骨弓と下顎角の間に張り、下顎骨を挙上し、上下歯列を強くかみ合わせる働きがある。側頭筋は、頭蓋側頭骨の広い部位から発し、頬骨弓内側を通り筋突起に付着する扇状の筋であり、機能的に前部筋束と後部筋束に分かれる。前部筋束は下顎を挙上し、かみしめ力を発生する。一方、後部筋束は下顎を後方に引く働きがある。内側翼突筋は下顎枝をはさんで咬筋と対称的に位置する筋であり、機能的にも咬筋と協調して活動するが、咬筋ほど強大ではない。外側翼突筋は上頭と下頭からなり、その活動は開口時には下顎頭を前方に牽引し、閉口時には下顎頭の後方移動に拮抗する^{4,25-29)}。

舌骨上筋はいくつかの筋からなるが、特に下顎運動に関与する顎二腹筋は、細長い筋で舌骨前後で前腹と後腹に分かれる。その活動は、舌骨が固定されているとき、開口時には下顎を引き下げ、閉口時には下顎の後退を補助する¹⁸⁾。

図 2 に正常有歯顎者の習慣的開閉口運動における

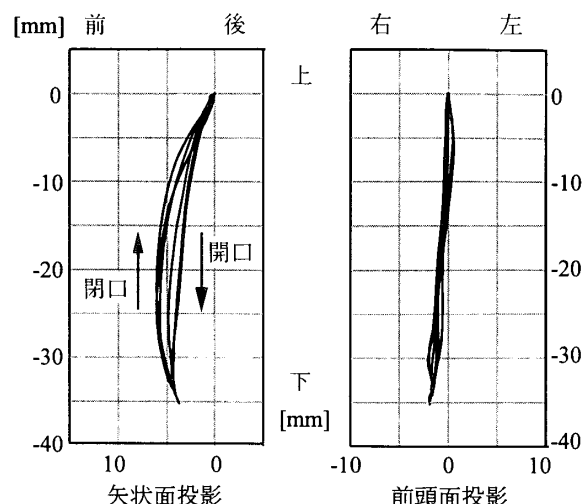


図 2 習慣的開閉口運動における切歯点の軌道

切歯点の軌道を示す。矢状面投影では軌道にばらつきが認められるが、開口初期と閉口末期の軌道は高い再現性を示す。前頭面投影では開口、閉口ともに軌道の再現性は高い。

3. シミュレータ JSN/1 D の構成

3.1 シミュレータの概要

図 3 に JSN/1 D 全体の構成を示す。システムは次の 5 つのサブシステムからなる：1) 上下顎部、2) 筋アクチュエータ、3) 咬合センサ、4) コントロールユニット、5) 制御用コンピュータ。

上下顎部は上顎部と下顎部に大別され、上顎部は上顎歯列とその支持部および顎関節からなり、下顎部は下顎歯列、下顎体部、下顎枝部からなる（図 4）。下顎枝の関節突起相当部には下顎頭に相当する顎頭球（直径 12 [mm]）が設けられ、下顎窩に相当するコンダイラハウジング内面（テフロン製）と顎関節を構成する。ハウジング内面は、関節隆起後方斜面を一次近似するものであり、その傾斜角、即ち矢状顎路傾斜度は可変とした。このような構造上、顎関節円板は再現できなかった。円板は、その前部に付着する外側翼突筋上頭の活動により、かみしめ時における関節複合体の剛性の確保²⁹⁾という重要な機能があるが、その再現は、関節窩形状をより生体に近づけたときの課題とした。

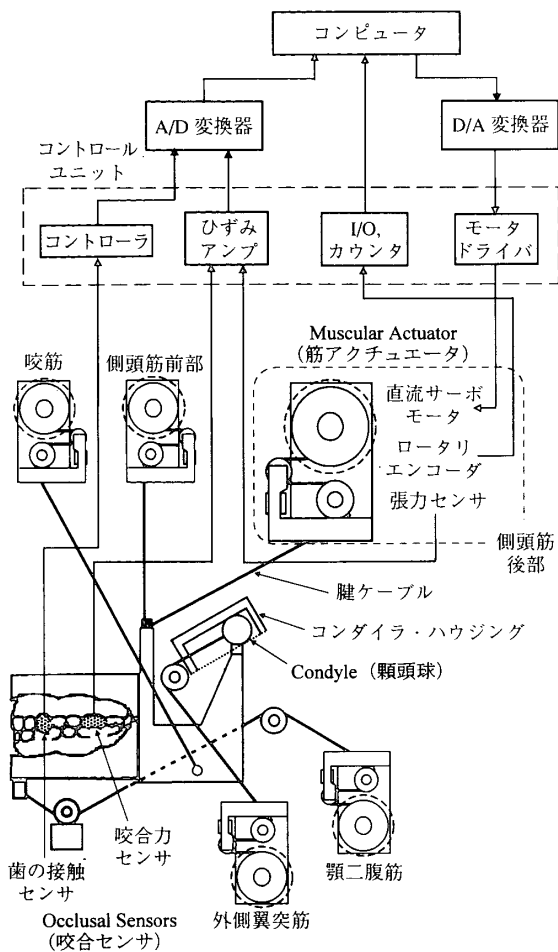
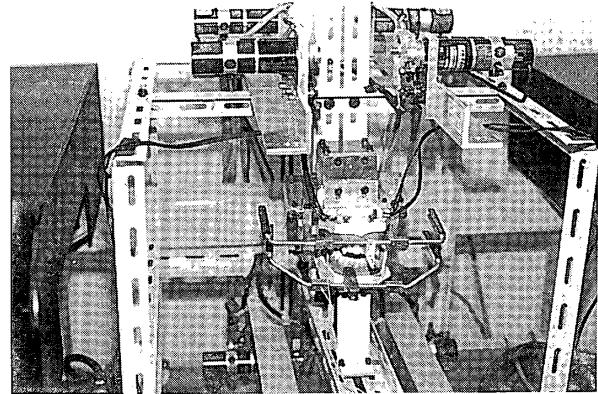


図3 シミュレータ JSN/1 Dの構成：全体は次の5つのサブシステムからなる：1) 上下顎部，2) 筋アクチュエータ，3) 咬合センサ，4) コントロールユニット，5) 制御用コンピュータ

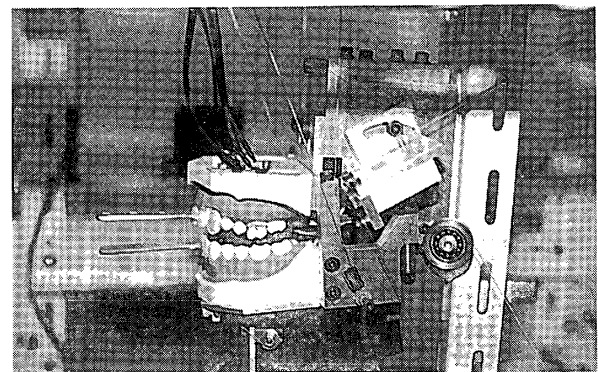
歯列には教育用歯列模型 (D 15 D-500 H, Nissin Dental Product Inc.) を用い，それを支持する上下顎骨は全てアルミニウムで製作した。歯列と顎関節および筋付着部位との位置関係は，乾燥頭蓋骨での計測値を参考にして決定した。

顎関節の運動を受動的に拘束する靱帯には，顎関節包および外側靱帯，側副靱帯としては蝶下顎靱帯，茎突下顎靱帯などがある。しかし，それらの機能を忠実に再現することは，コンダイラハウジングの構造上，困難であるため，下顎頭の下方移動を制約する機能だけを，顎頭間軸（両側顎頭球中心を結ぶ線分）の中央点をスプリングで上方に牽引することにより近似した。

下顎運動に関係する筋は，筋と同じ走行をもつケーブルを DC サーボモータで駆動する方法でシミュ



(a) 上下顎部と筋アクチュエータ



(b) 上下顎部

図4 顎運動シミュレータ JSN/1 D

レートした¹¹⁻¹⁵⁾ (図3)。これを筋アクチュエータ (muscular actuator) と呼ぶ。このアクチュエータには，さらにケーブル長とケーブル張力を検出する内部感覚センサも組み込まれている¹¹⁻¹⁵⁾。その詳細については次節で述べる。シミュレートする筋群は，咬筋，側頭筋の前部と後部，外側翼突筋，顎二腹筋 (図1) とした。

歯の感覚は下顎運動の制御に深く関与していることが知られている^{17,21)}。そこで JSN/1 D にも上顎左右第一大臼歯と左右犬歯に，それぞれ咬合力センサと咬合接触センサを装着した¹²⁻¹⁵⁾。それらの詳細については 3.3 で述べる。

コントロールユニットは感覚センサ信号の検出回路とモータ駆動回路からなる。すべての感覚信号はインターフェイス回路を介して制御用コンピュータに取り込まれる (サンプリング周期，10 [ms])。制御用コンピュータは，ソフトウェアで発生する駆動信号と感覚信号からモータ駆動電圧を逐次算出し，D/A コンバータを介して DC モータを駆動する。

3.2 筋アクチュエータ

図5に筋アクチュエータの構造を示す。アクチュエータは、筋と腱に相当するケーブルをプーリを介して直流サーボモータ (RH-8-3006-E 100 DO, Harmonic Drive Systems) で駆動する型 (cable-tendon DC-servo actuator) とした¹³⁻¹⁵⁾。ケーブルは、モータ軸に直結する第1プーリで巻きとり、他の2つのプーリを介して下顎部の筋付着相当部に接続する (図3, 図4)。ケーブルの走行は、シミュレートする筋の走行とできるだけ等しくなるように設定した。

モータには同軸でロータリーエンコーダが組み込まれており、検出された回転角とプーリの半径からケーブルの長さ変化を算出できる。これは筋の長さ変化を検出する伸張受容器、筋紡錘 (muscle spindle) の機能をシミュレートしたものである。

ケーブルの張力を検出するために、第2プーリを支持する片持ち梁に歪みゲージ (B-FAE-05 W-12 T 11, ミネベア) を貼付した¹³⁻¹⁵⁾。図5の構造から梁の変形はケーブル張力に比例するため、その関係を事前にキャリブレーションしておけば、歪み量からケーブル張力を算出できる。歪みアンプで検出された歪み量は、A/D変換を介して制御用コンピュータに取り込まれる (図3)。この張力検出器は、腱に内在するゴルジ腱器官 (Golgi's tendon organ) の機能をシミュレートしたものである。

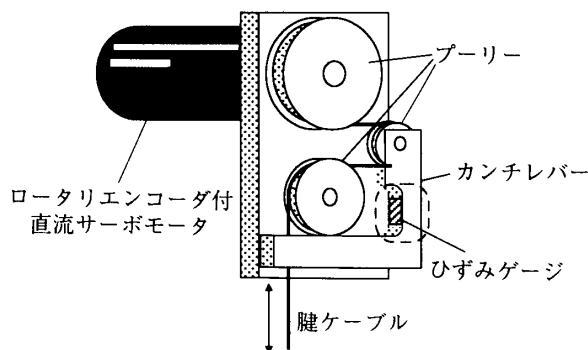


図5 JSN/1Dの筋アクチュエータ：筋と腱に相当するケーブルをプーリを介して直流サーボモータ駆動する型。ケーブル長を検出するロータリーエンコーダとケーブル張力センサを内蔵

3.3 歯根の感覚センサ (咬合センサ)

歯は目に見える歯冠部と骨の中に埋まっている歯根部からなる。歯根部は歯根膜と呼ばれる軟組織を介して歯槽骨に接合している。その機能はかみしめ力の緩衝と接触や圧力の検出である^{18,20)}。咬合力を検出するために、歯根膜は多くの機械受容器を含んでいる²⁰⁾。その出力は咀嚼筋の運動ニューロンにフィードバックされ、咀嚼圧や下顎運動の調節に利用されている^{17,21)}。

咀嚼運動で効率よく食片を粉砕するためには、咬合接触ないしその直前の下顎位を正確に制御する必要がある。接触時の下顎位は歯の接触感覚によって正確に認識できることから、その感覚情報は上位中枢にも伝達され、下顎運動の制御パラメータの最適化に利用されているものと考えられている²¹⁾。

実際の歯は、咬合面に加わる力を3次元的に検出できるが、全く同じ機能をシミュレータ上の全ての歯で再現するのは不可能である。そこで、開閉口運動や咀嚼運動の制御に最小限必要とされる感覚センサにとどめた。具体的には、上顎第一大臼歯には歯軸方向に加わる力を検出するセンサ (咬合力センサ) を装着し、上顎犬歯には頬舌方向の変位を検出するセンサ (咬合接触センサ) を装着した (図3)。

咬合接触センサは歯槽に固定する固定子と犬歯に固定する可動子からなる (図6(a))。固定子には反射型ホトセンサ (NJL 5163 K-F 1, 新日本無線) が

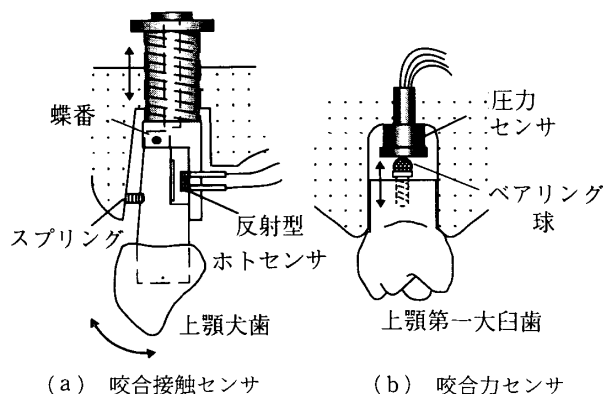


図6 歯の感覚センサ

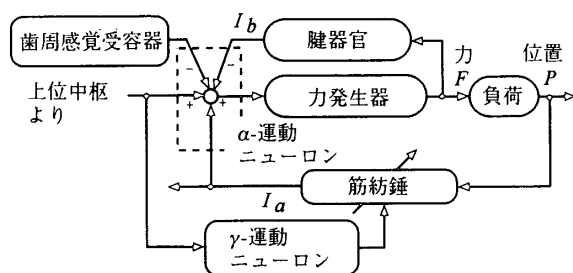
(a) 咬合接触センサ、上顎犬歯の頬舌方向の微小変位を反射型ホトセンサで検出；(b) 咬合力センサ、上顎第一大臼歯に歯軸方向から加わる力を圧力センサで検出

設置されており、可動子の反射面（ケント紙）との距離を検出する。

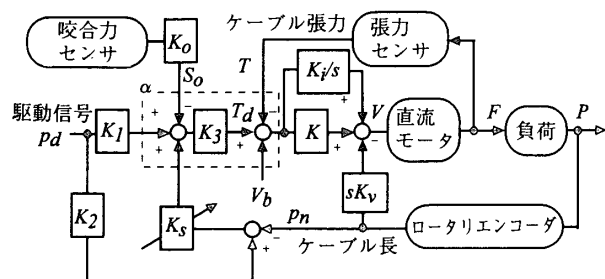
咬合力センサには超小型圧力センサ（PS-B、共和電業）を用い、図6(b)のように、その受圧面が歯軸に対して垂直になるように上顎第一大臼歯の歯槽部に固定した。センサに力を加える歯根先端部には鋼球を取り付けた。このセンサ出力から、左右第一大臼歯部における咬合力の歯軸方向成分を得ることができる。

3.4 アクチュエータの制御系

ヒトの筋活動は、上位運動中枢からの運動信号により、 α 運動ニューロンを介して制御されている（図7(a)）。 α 運動ニューロンには、筋紡錘とゴルジ腱器官からの感覚情報がフィードバックされており²²⁾、顎口腔系では歯根膜受容器の出力もフィードバックされている^{17,20,21)}。さらに筋活動は、筋紡錘の錘内筋を支配する γ 運動ニューロンの活動によっても間接的に駆動されている。近年では、 α と γ 運動ニューロンの協調した活動により、筋の長さ制御が行われていると考えられている（ α - γ 連関²²⁾）。このように脊髄レベルの筋制御系は、図7(a)に示



(a) ヒトの脊椎レベルの筋制御系



(b) 筋アクチュエータのインピーダンス制御系

図7 ヒトの筋制御系と筋アクチュエータの制御系

すように、一種のインピーダンス制御系を構成している。

従来の顎運動シミュレータ⁵⁻⁹⁾や膝運動シミュレータ²³⁾の制御では、主として位置制御と力制御が用いられてきた。我々のシミュレータJSN/1Dは、単に下顎運動に近い動作をロボットで再現するのではなく、顎運動メカニズムの解明を目標としている。そのため、制御系もできるだけ図7(a)に近い構成とした¹¹⁻¹⁵⁾。そのブロック図を図7(b)に示す。

筋アクチュエータは上位中枢からのインパルスに相当する駆動信号 p_d で駆動する。感覚センサの出力は、実際の筋の制御系と同様、 α 運動ニューロンに相当する加算点 α にフィードバックされ、DCモータの駆動電圧を調節する。位置の誤差のフィードバック利得 K_s ($0 \leq K_s \leq 1$) は制御モードを変化させるパラメータであり、 $K_s=0$ とすれば張力制御、 $K_s=1$ とすればインピーダンス制御となる。このパラメータは α と γ 運動ニューロンの協調活動の可変性をシミュレートしたものである。但し、この制御系は各運動単位のサーボ機構（図7(a)）を再現したものではなく、筋全体のマクロな制御系の近似にすぎない。そのため図7(b)の各要素は、必ずしも図7(a)のある要素に1対1には対応していない。

筋は可変粘弾性特性をもつ張力発生器と見なすことができ、その特性は、1) 運動単位の発火頻度、2) 活動する運動単位の数、3) 運動単位のサイズの3要素によって調節されている^{16,24)}。しかし、これと全く同じメカニズムは、シミュレータ上では再現できない。そのため、上記の調節性を近似するとき、「制御系のどのパラメータを可変にするか」が大きな問題となる。本研究では、対象とする下顎運動が開閉口運動だけであることから、簡単のために駆動信号 p_d と位置フィードバック利得 K_s だけを可変とすることにした。

4. 習慣的開閉口運動の筋制御仮説

習慣的開閉口運動における咀嚼筋ならびに顎二腹筋の筋電図については多くの報告があり^{4,25-29)}、それをまとめたのが表1である。各運動相（開口相、

表 1 習慣的開閉口運動における咀嚼筋ならびに顎二腹筋の活動^{4,25-29,35}：○と×はそれぞれ活発な活動とほとんど活動しないことを表す

| 筋 名 | 開口相 | 閉口相 | 咬合相 |
|----------|-----|-----|-----|
| 咬筋 | × | × | ○ |
| 側頭筋 | × | ○ | ○ |
| 外側翼突筋 上頭 | × | ○ | ○ |
| 下頭 | ○ | × | × |
| 内側翼突筋 | × | × | ○ |
| 顎二腹筋前腹 | ○ | × | × |

閉口相、咬合相)において、筋が活発に活動するときには○、ほとんど活動しないときには×で表した。外側翼突筋の活動については、完全には意見が一致していないものの⁴⁾、下頭は開口時に活動し、上頭は主に閉口時とかみしめ時に活動すると報告されている^{4,25-30)}。しかし、JSN/1Dではまだ関節円板が再現されていないため、外側翼突筋アクチュエータも上頭と下頭に分離されていない(図3)。

習慣的開閉口運動の開口相は、表1に示すように外側翼突筋下頭と顎二腹筋前腹の協調活動により駆動されている。両筋とも筋紡錘はほとんど認められないことから³²⁾、両筋に相当するアクチュエータの制御はフィードバック利得を $K_s=0$ とし、張力制御モードとした。

閉口相で活動する筋は、側頭筋の前部と後部、外側翼突筋上頭である(表1)。咬筋と内側翼突筋には活発な活動が認められないため²⁶⁾、垂直的下顎位は主として側頭筋前部により制御されているものと考えられている。側頭筋には浅層と深層に筋紡錘が数多く認められ^{31,32)}、かつ開閉口運動は再現性が高い¹⁹⁾ことから、側頭筋では閉口時に伸張反射系を利用した筋の長さ制御が行われているものと推察される³³⁾。そこで側頭筋前部アクチュエータは、閉口相でインピーダンス制御することにした¹⁵⁾。またフィードバック利得 K_s は、閉口相中、下顎張反射の大きさに著しい変化が認められないことから³⁴⁾、簡単のために $K_s=1$ で一定とした。

咬筋と内側翼突筋はかみしめ時に活発に活動し、強いかみしめ力を発生する²⁶⁾。そこで咬筋アクチュエータは、咬合相のみで駆動することにした¹⁵⁾。その制御モードはインピーダンス制御($K_s=1$)とし

た。

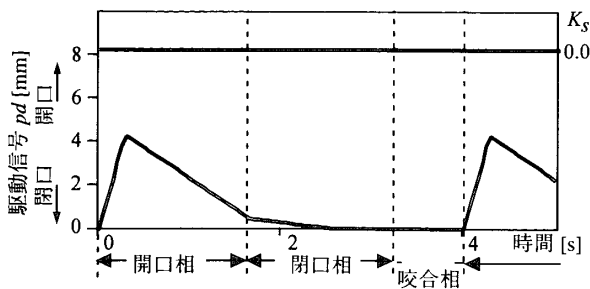
残る課題は、閉口時の水平的下顎位の制御に関与する外側翼突筋と側頭筋後部アクチュエータの駆動法である。両筋とも閉口相と咬合相で活動する(表1)。外側翼突筋には筋紡錘がほとんど認められないため^{30,32)}、下顎頭の位置制御は困難である。従って、その活動は閉口筋活動による下顎頭の後方移動力に拮抗し、前後位置に関するインピーダンスを高めているものと考えられる^{4,25-30)}。その拮抗筋は解剖学的に側頭筋後部以外にはない。そこで次のような制御仮説を導入した：「閉口時における水平的下顎位は、側頭筋後部と外側翼突筋の拮抗活動により制御されている」。JSN/1Dでは、この制御仮説を側頭筋後部アクチュエータのインピーダンス制御($K_s=1$)と外側翼突筋の張力制御($K_s=0$)で実現することにした。

5. 実験方法

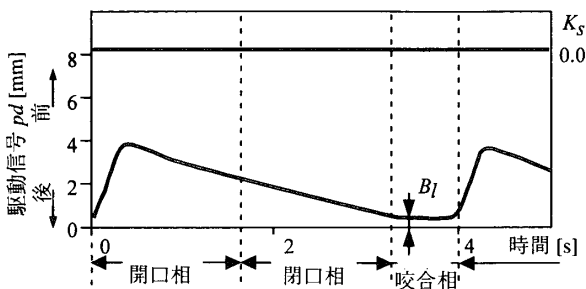
5.1 筋アクチュエータの駆動信号 p_d

図8に筋アクチュエータの駆動信号 p_d とフィードバック利得 K_s の時系列データを示す。周期的な開閉口運動を開口相、閉口相、咬合相の3相に分類し、各相における駆動信号 p_d 、ゲイン K_s を、4.で述べた制御仮説と筋電図データ^{4,25-29,35)}を参考に決定した。張力制御するアクチュエータの駆動信号は折れ線で近似し、インピーダンス制御する側頭筋および咬筋アクチュエータの駆動信号は正弦波状に滑らかに変化させた。

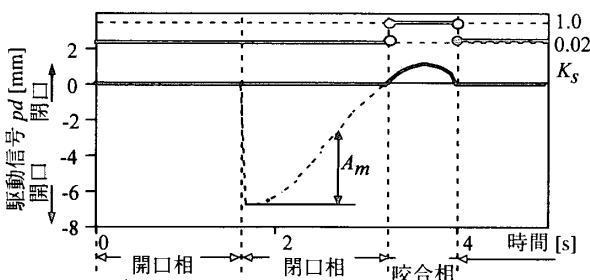
閉口筋アクチュエータは、活動していないときには生体と同様に弱い弾性体として機能するように、その区間での利得 K_s を極めて小さな値($K_s=0.005, 0.02$)に設定した。閉口筋アクチュエータの駆動信号 p_d の振幅 A_m 、 A_a 、 B_p と外側翼突筋アクチュエータの咬合相での駆動信号レベル B_i (図8)は、事前には決定できないため、5.2で述べるように歯の感覚センサの出力を用いて適応的に最適化した。



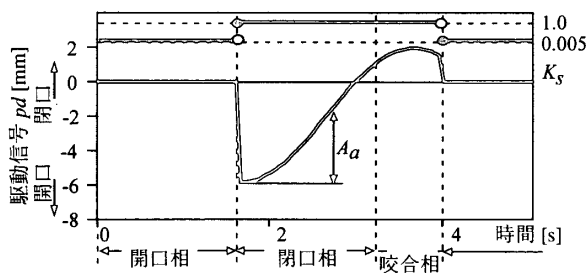
(a) 顎二腹筋アクチュエータ



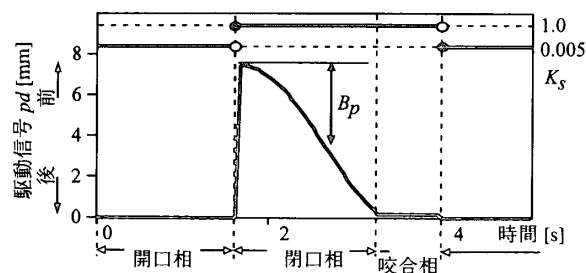
(b) 外側翼突筋アクチュエータ



(c) 咬筋アクチュエータ



(d) 側頭筋前部アクチュエータ



(e) 側頭筋後部アクチュエータ

図 8 筋アクチュエータの駆動信号 p_d とフィードバック利得 K_s

5.2 制御系のパラメータ値

ヒトの習慣的開閉口運動では、左右の歯列がほぼ同時に接触し、かつかみしめ力も等しい¹⁹⁾。この両側での咬合均衡を JSN/1D で再現するために、咬合センサの出力データを用いて、駆動信号 p_d のパラメータ A_m , A_a , B_i , B_p (図 8) を最適化した。

左右接触センサ出力がある閾値以上になる時間をそれぞれ t_L , t_R とし、咬合接触時間と呼ぶ。目標最大咬合力を V_{obj} とし、左右咬合力の最大値を V_L , V_R とする。左右接触時間差 Δt , 左右咬合力の偏差 ΔV_L , ΔV_R を、

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_R - t_L \\ \Delta V_R &= V_{obj} - V_R \\ \Delta V_L &= V_{obj} - V_L\end{aligned}\quad (1)$$

で定義した。これらの偏差が零に収束するように、駆動信号パラメータを 1 周期ごとに更新した。その適応アルゴリズムを以下に示す。周期番号を i , 更新のステップ幅を τ と κ とする。添字 L , R はそれぞれ左右を表す。

1) 咬筋

$$\begin{aligned}A_{m,R}(i+1) &\leftarrow A_{m,R}(i) + \tau \Delta V_R(i) \\ A_{m,L}(i+1) &\leftarrow A_{m,L}(i) + \tau \Delta V_L(i)\end{aligned}\quad (2)$$

2) 側頭筋前部

$$\begin{aligned}A_{a,R}(i+1) &\leftarrow A_{a,R}(i) + \tau \Delta V_R(i) \\ A_{a,L}(i+1) &\leftarrow A_{a,L}(i) + \tau \Delta V_L(i)\end{aligned}\quad (3)$$

3) 側頭筋後部

$$\begin{aligned}B_{p,R}(i+1) &\leftarrow B_{p,R}(i) + \kappa \Delta t \\ B_{p,L}(i+1) &\leftarrow B_{p,L}(i) - \kappa \Delta t\end{aligned}\quad (4)$$

4) 外側翼突筋

$$\begin{aligned}B_{i,R}(i+1) &\leftarrow B_{i,R}(i) - \kappa \Delta t \\ B_{i,L}(i+1) &\leftarrow B_{i,L}(i) + \kappa \Delta t\end{aligned}\quad (5)$$

パラメータ A_m , A_a , B_p , B_i の初期値は、意図的に左右差を与え $A_{m,R}=5.1$, $A_{m,L}=4.7$, $A_{a,R}=3.9$, $A_{a,L}=3.7$, $B_{p,R}=4.5$, $B_{p,L}=4.35$, $B_{i,R}=0.55$, $B_{i,L}=0.7$ とした。ステップ幅は $\tau=0.1$, $\kappa=0.2$ とし、目標咬合力は $V_{obj}=7.7$ [N] とした。開閉口運動は周期 4 秒とし、50 回連続して行った。また同じ実験を 5 回繰り返した。筋アクチュエータの制御系の利得 (図 7(a)) は、従来の研究¹¹⁻¹⁵⁾から

表 2 アクチュエータの制御系 (図 7(b)) の利得

| 筋 名 | K_1 | K_2 | K_3 | K_o | K_v | K_i | K |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 咬筋 | 0.5 | 0.5 | 60.0 | 0.008 | 0.02 | 0.001 | 0.6 |
| 側頭筋 前部 | 0.5 | 0.5 | 60.0 | 0.008 | 0.02 | 0.001 | 0.4 |
| 後部 | 0.5 | 0.5 | 8.0 | — | 0.02 | 0.001 | 0.8 |
| 外側翼突筋 | 0.5 | 0.5 | 8.0 | — | 0.02 | 0.001 | 0.8 |
| 顎二腹筋前腹 | 0.5 | 0.5 | 4.0 | — | 0.02 | 0.001 | 0.8 |

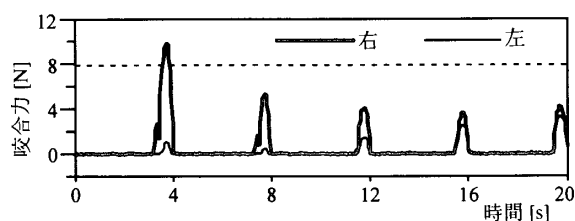
表 2 のように設定した。

側頭筋後部筋束において、伸張反射系を用いた位置制御がどの程度必要なのかを明らかにするために、対応するアクチュエータの閉口相と咬合相における利得 K_s を低下させた対照実験を上と同じ方法で行った。 $K_s < 1.0$ では、アクチュエータは完全には位置制御できなくなり、力制御モードに近くなる。そのため、駆動信号 p_d とワイア長 p_n は必ずしも一致しない。 K_s の値は $K_s = 0.8, 0.6$ の 2 通りとした。

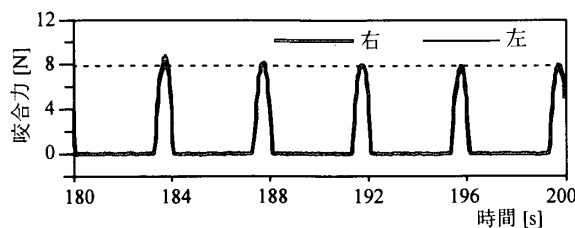
下顎運動は、発光ダイオードとリニア CCD カメラを用いた 6 自由度顎運動測定システム JKN/1³⁶⁾ で記録した (図 4(a))。

6. 実験結果

図 9 に咬合力の測定データの代表例を示す。運動



(a) ストローク 1~5



(b) ストローク 46~50

図 9 適応収束前後における咬合力データの一例

開始直後は咬合力データに大きな左右差が認められたが (図 9(a)), 5~10 回の反復でほぼ等しい値に収束し、その後もその状態を維持した (図 9(b))。図 10 と図 11(a) に、それぞれ規格化された咬合力

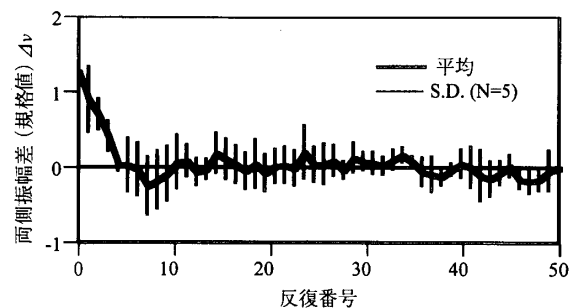
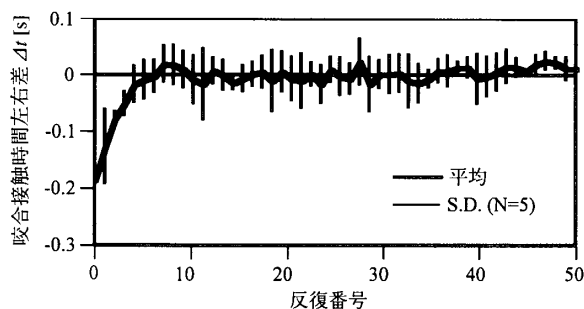
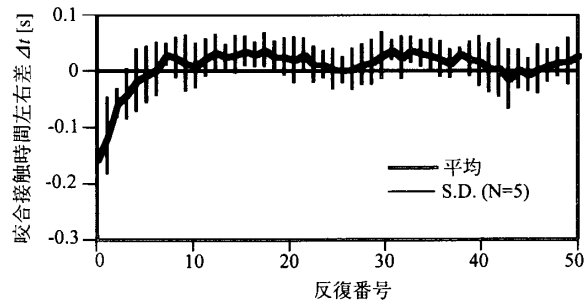
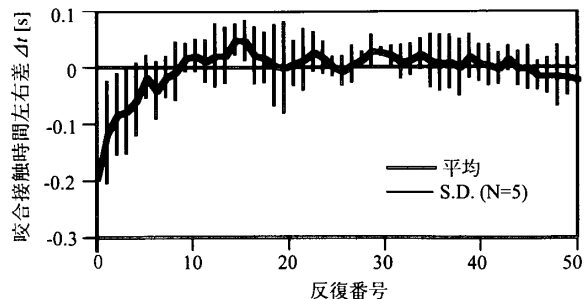


図 10 反復による左右咬合力差の変化: 5 回の実験データの平均と標準偏差

(a) $K_s = 1.0$ (b) $K_s = 0.8$ (c) $K_s = 0.6$ 図 11 反復による咬合接触時間の左右差 Δt の変化
5 回の実験データの平均と標準偏差

の左右差 $\Delta v = 2(V_R - V_L) / (V_R + V_L)$ と左右咬合接触時間差 Δt の各反復における平均と標準偏差を示す。両左右差とも平均的に10回以下の反復で零に

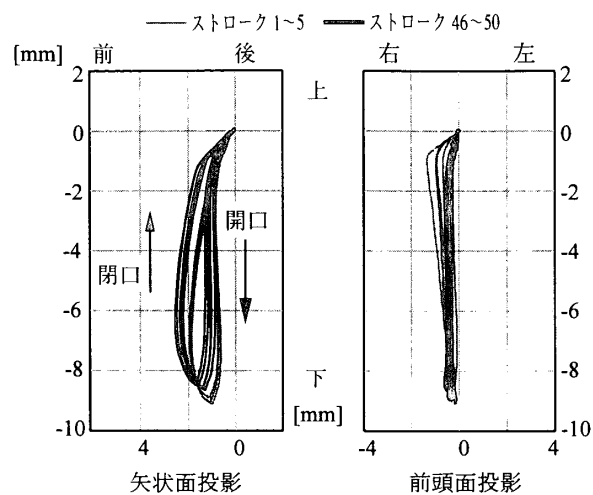
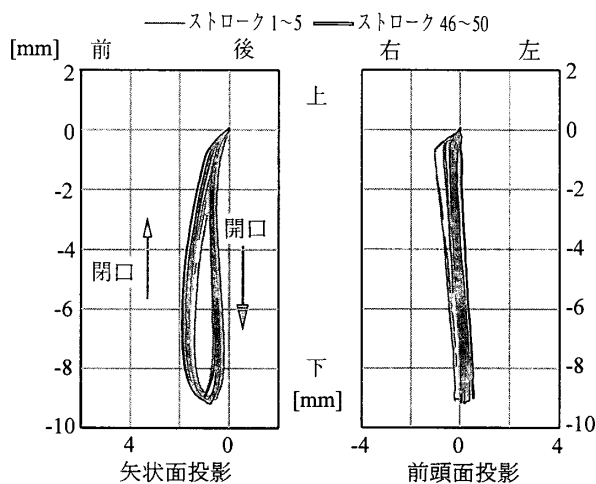
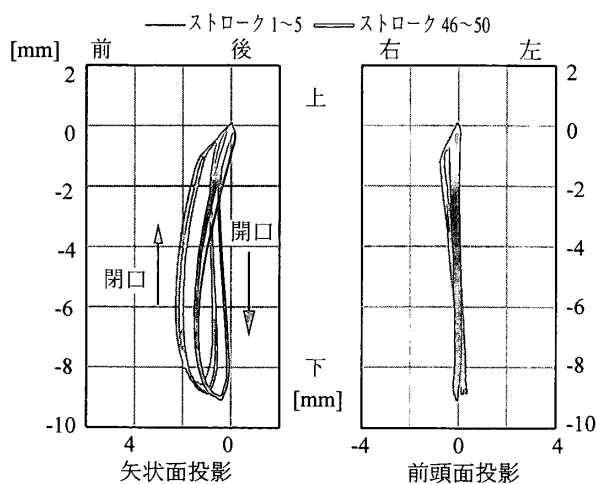
(a) $K_s = 1.0$ (b) $K_s = 0.8$ (c) $K_s = 0.6$

図12 適応収束前後における切歯点軌道の一例

収束した。図9と同じデータの切歯点軌道を図12(a)に示す。前頭面投影図では、運動開始時に閉口相で右側への変位が認められるが、数ストロークではほぼ正中から咬頭嵌合位に閉口するようになり、その後も安定した軌道を示した。また、その矢状面投影は、やや前方から咬頭嵌合位に閉口するものの、ヒトに近い軌道を示した(図2と比較)¹⁾。その開口相では軌道に前後的なばらつきが認められるが、閉口相、特にその末期での軌道は高い再現性を示した。

側頭筋後部アクチュエータの利得 K_s を減少させた対照実験の結果を図11(b), (c)と図12(b), (c)に示す。図11(b), (c)は咬合接触時間の左右差 Δt のデータである。 $K_s = 0.8$ と 0.6 の場合ともに適応後も左右差が大きく、 $K_s = 1.0$ のデータ(図11(a))と比べて水平的下顎位の再現性が低かった。そのときの下顎切歯点の軌道の一例を図12(b), (c)に示す。 $K_s = 0.8$ の場合(図12(b)), 前頭面投影(図12(b)右)の軌道が左右にばらついており、水平的下顎位の再現性は図12(a)に比べて低下した。一方、 $K_s = 0.6$ の場合(図12(c)), 前頭面投影(図12(c)右)における軌道の再現性は向上したが、その原因は矢状面投影(図12(c)左)から分かるように、上下歯列接触の直前に蝶番運動になっているためであった。この傾向は、他の例ではより顕著であり、閉口相における前後的な下顎位の再現性は $K_s = 1.0$ の場合に比べてかなり低下した。このような運動は、下顎頭が歯列接触以前に最後方位に後退することにより生じるものであり、正常者ではほとんど認められない¹⁹⁾。

7. 考 察

開閉口運動における咀嚼筋ならびに顎二腹筋の活動については、筋電図学的には数多く報告されているが^{4,25-29,35)}、活動の機能については、筋活動、組織学的観察、筋線維構成、筋紡錘の分布、神経支配などから推察されているのみである^{30,31)}。本章では特に習慣的開閉口運動の閉口相における下顎位の制御について論じる。

閉口相における水平的下顎位の制御に関与する要因としては、受動的には主として関節包、靱帯、円板後部結合組織があり、能動的には咀嚼筋がある。この中の受動要素は、JSN/1Dでは顆頭間軸中央点をバネで牽引しているだけであるため、実際の生体よりもまだ自由度が大きい。しかし咬頭嵌合位付近では、下顎頭の前後的な拘束はほとんどない（大石 1967³⁷⁾）ことから、閉口相末期では受動的な拘束はほとんど無視できるものと考えられる。このことは、ほとんど能動要素、即ち筋活動だけで水平的下顎位を制御しなければいけないことを示している。

閉口相で活動し下顎位の制御に関与できる筋は外側翼突筋と側頭筋後部以外にはない（表 1, 図 1）。外側翼突筋の活動は、閉口相では主として上頭が活動し^{4,25-27,29)}、その機能は下顎頭の位置の安定化（Widmalm 1987²⁷⁾）、下顎頭に対する円板の位置調節（日比野⁴⁾、平場²⁹⁾1992）、下顎頭の過剰な後方移動の抑制、安定化³⁰⁾にあるとされている。しかし水平的下顎位の制御の観点からはほとんど論じられていない。位置の安定性を高める方法には、伸張反射系を用いて位置制御する方法（ α - γ 連関²²⁾）と拮抗筋との協調活動（co-contraction）によりインピーダンスを高める方法がある^{16,24)}。この 2 つの観点から、水平的下顎位の制御法について考える。

閉口相では側頭筋前部と外側翼突筋上頭が類似した活動を示すことが知られている^{26,35)}。側頭筋前部の活動は下顎頭を後上方に移動させ、外側翼突筋の活動は下顎頭を前下方に牽引する。そのため、両筋の協調活動は、下顎頭の位置に関しては互いに拮抗している。この拮抗活動は下顎頭の前後位置のコンプライアンスを低下させ、水平的下顎位の再現性を高めているものと考えられる。しかし、側頭筋前部は主として垂直的下顎位の制御に関与しており³¹⁾、走行的にも水平的下顎位の制御にはまったく向いていない。

そこで我々は、筋の走行が水平に近い側頭筋後部筋束の活動に注目した。この筋束の活動は下顎を後退させる働きがあり³¹⁾、咀嚼運動では前部筋束とは異なった活動を示す（Moeller 1966³⁵⁾）。そこで開閉口運動の閉口相においても、外側翼突筋との拮抗に

より水平的下顎位を制御しているものと考えた。それを検証するために、4.で示した制御仮説を提案し、JSN/1Dで運動を再現した。その結果、側頭筋後部アクチュエータをインピーダンス制御し、拮抗する外側翼突筋を張力制御すれば、実際に再現性の高い開閉口運動、特に閉口運動を得られることが確認された（図 9-11(a), 12(a)）。適応後のシミュレータの動作を観察すると、「側頭筋後部は、外側翼突筋の拮抗活動により適度な張力が与えられ、水平的下顎位を調節している」ように見受けられた。

また対照実験として、筋長のフィードバック利得 K_s を減少させた実験も行った。その結果、閉口相における水平的下顎位は安定せず、再現性は顕著に低下した（図 11(b), (c), 12(b), (c)）。この制御下で下顎頭の位置を安定させるためには、外側翼突筋と側頭筋後部の協調活動を著しく増加しなければならないが、外側翼突筋は筋束の細い上頭が主に活動することから^{4,25-27,29)}、その可能性は低いものと考えられる。

8. あとがき

下顎運動シミュレータ JSN/1D を用いて、習慣的開閉口運動、特に閉口運動における下顎位の制御について調べた。従来、閉口相における外側翼突筋の活動は主に顎関節円板の下顎頭に対する位置調節の観点から論じられてきたが、我々は側頭筋後部との拮抗活動により水平的下顎位を制御しているものと考えた。そのような制御仮説による開閉口運動を、側頭筋後部のインピーダンス制御と外側翼突筋の張力制御を用いて JSN/1D 上で実現した。その結果、実際にヒトに近い開閉口運動を再現できることが確認され、上記制御仮説が必要条件は満たしていることが分かった。その十分性を生体での実験を含めて検証することが、今後の課題である。

本研究の一部は、モリタ製作所奨学寄付金および平成 7 年度、平成 8 年度、平成 9 年度文部省科学研究費補助金一般研究 C（課題番号 07838011, 8835008, 09680850）の援助によるものである。

参考文献

- 1) Gibbs, C.H. *et al.*: Functional movements of the mandible, *J. Prosthet. Dent.*, 26, 604-620, (1971).
- 2) 渡部厚史: 側方滑走運動による上下顎大臼歯間の接触間隙の変化, 補綴誌, 39(3), 517-529, (1995).
- 3) Lund, J.P.: Mastication and its control by brain stem, *Clinical Reviews in Oral Biology and Medicine*, 2(1), 33-64, (1991).
- 4) 日比野和人, 平場勝成, 平沼謙二: ヒト外側翼突筋上頭・下頭の機能的相違について; 1. 各種基本運動時の活動様式ならびに解剖学的考察, 補綴誌, 36(2), 84-97, (1992).
- 5) 高西淳夫: 咀嚼機械システムの開発, BME 2(12), 27-34, (1988).
- 6) 高西淳夫, 谷知之, 田名瀬崇, 加藤一郎: 咀嚼機械システムの開発; 3 自由度顎機械モデル WJ-2, バイオメカニズム学会編バイオメカニズム 10, 71-81, 東京大学出版会, (1990).
- 7) 高西淳夫: 咀嚼ロボットの開発研究, 日本咀嚼学会雑誌 2(1), 9-18, (1992).
- 8) Takanobu, H., Tanase, T., Takanishi A., & Kato, I.: Adaptive masticatory jaw motion using jaw position biting force information, *Proc. IEEE Intern. Conf. MFI* (MFI 94), 360-365, (1994).
- 9) 高信英明, 須長義徳, 中澤正幸, 高西淳夫: 咀嚼ロボットの開発; 咀嚼効率の向上を目指した顎運動制御, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1109-1110, (1996).
- 10) 青木たまよ, 林豊彦, 中嶋新一, 小林博, 宮川道夫: 自律顎運動ロボットの顎体と咬合力センサの試作, 信学技報, MBE 93-75, 115-122, (1993).
- 11) 田村和己, 林豊彦, 青木たまよ, 中嶋新一, 小林博, 宮川道夫, 石岡靖: 自律顎運動ロボット JSN/1 における咬筋アクチュエータの制御, 信学技報, MBE 94-13, 97-104, (1994).
- 12) 青木たまよ, 林豊彦, 田村和己, 中嶋新一, 小林博, 宮川道夫, 石岡靖: 自律顎運動シミュレータ JSN/1 B によるかみしめを伴う開閉口運動, 信学技報, MBE 94-106, 89-96, (1994).
- 13) 田村和己, 林豊彦, 中嶋新一, 小林博, 山田好秋, 石岡靖, 宮川道夫: 自律開閉口運動を行う顎運動シミュレータ JSN/1 C における筋アクチュエータの制御; 筋制御系の改良, 信学技報, MBE 95-119, 61-68, (1995).
- 14) 田中澄江, 林豊彦, 中嶋新一, 小林博, 山田好秋, 石岡靖, 宮川道夫: 自律顎運動シミュレータ JSN/1 C の開閉口運動における感覚受容器の働き, 第5回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, 147-152, 計測自動制御学会, (1996).
- 15) 池津正人, 林豊彦, 田中澄江, 中嶋新一, 小林博, 山田好秋, 石岡靖, 宮川道夫: 自律顎運動シミュレータ JSN/1 D における開閉口運動の適応制御機構, 信学技報, MBE 97-7, 45-52, (1997).
- 16) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, 7-8; 121-146, 計測自動制御学会, (1991).
- 17) 森本俊文: 咀嚼力の調整に関する歯根膜感覚の役割, 日本歯科医学会誌, 8, 18-24, (1989).
- 18) Mohl, N.D., Zarb, G.A., Carlsson, G.E., & Rugh, J. D., 藍稔監訳: オクルージョン, 105-122, クインテッセンス出版株式会社, (1993).
- 19) 川口豊造: 電気的測定装置による習慣的開閉口運動および嚥下運動時の歯牙接触位に関する研究, 補綴誌, 12(2), 184-209, (1968).
- 20) 前田憲彦: 顎運動に関与する抹消効果器の基本構造と比較解剖, 顎口腔機能分析の基礎とその応用, 14-25, デンタルダイヤモンド社, (1991).
- 21) 森本俊文: 顎運動の生理, 顎口腔機能分析の基礎とその応用, 26-35, デンタルダイヤモンド社, (1991).
- 22) 本郷利憲, 廣重力, 豊田順一, 熊田衛編: 標準生理学第3版, 263-288, 医学書院, (1993).
- 23) More, R.C., Karras, B.T., Neiman, R., Fritschy, D., Woo, S.L-Y, & Daniel, D.M.: Hamstrings—an anterior cruciate ligament protagonist; An in vitro study, *Am. J. Sports Med.*, 21(2), 231-237, (1993).
- 24) 赤沢堅造: 運動制御と筋特性, 計測と制御, 33(4), 304-309, (1994).
- 25) Mahan, P.E., Wilkinson, T.M., Gibbs, C.H., Mauderli, A.M., & Brannon, L.S.: Superior and inferior bellies of the lateral pterygoid muscle EMG activity at basic jaw positions, *J. Prosthet. Dent.*, 50(5), 710-718, (1983).
- 26) Gibbs, C.H., Mahan, P.E., Wilkinson, T.M., & Mauderli, A.: EMG activity of the superior belly of the lateral pterygoid muscle in relation to other jaw muscles, *J. Prosthet. Dent.*, 51(5), 691-702, (1984).
- 27) Widmalm, S.E., Lillie, J.H., & Ash Jr, M.M.: Anatomical and electromyographic studies of the lateral pterygoid muscle, *J. Oral Rehabil.*, 14, 429-446, (1987).
- 28) 高橋一也: 開口運動における外側翼突筋下頭・顎二腹筋前腹の筋電図学的研究, 補綴誌, 34(3), 559-752, (1990).
- 29) 平場勝成, 日比野和人, 平沼謙二: ヒト外側翼突筋上頭・下頭の機能的相違について, 補綴誌, 36(2), 328-339, (1992).
- 30) 尚原弘明: 外側翼突筋, 顎関節小事典, 50-53, 日本歯科評論社, (1990).
- 31) 佐藤巖: 側頭筋, 顎関節小事典, 45-47, 日本歯科評論社, (1990).
- 32) Kubota, K. & Masagi, T.: Muscle spindle supply to the human jaw muscle, *J. Dent. Res.*, 56, 901-909, (1977).
- 33) 森本俊文: 咀嚼筋固有感覚と顎運動・顎反射, 歯基礎誌, 27, 1-15, (1985).
- 34) van der Bilt, A., Ottenhoff, F.M.A., van der Glas, H.W., Bosman, F. & Abbink, J.H.: Modulation of the mandibular stretch reflex sensitivity during various phases of rhythmic open-close movements in humans, *J. Dent. Res.*, 76(4), 839-847, (1997).
- 35) Moeller, E.: The chewing apparatus, *Acta Physiol Scand*, 69 (Suppl 280), 1-229, (1966).
- 36) Hayashi, T., Kurokawa, M., Miyakawa, M., Aizawa, T., Kanaki, A., Saitoh, A., & Ishioka, K.: A high-resolution line sensor-based photostereometric system for measuring jaw movements in 6 degrees of freedom, *Frontiers Med. Biol. Engng.*, 6(3), 171-186, (1994).
- 37) 大石忠夫: 下顎運動の立場からみた顎関節構造の研究, 補綴誌, 11, 197-220, (1967).

DEVELOPMENT OF A JAW-MOVEMENT SIMULATOR, JSN/1 D, AND ITS CONTROL FOR AUTONOMOUS OPEN-CLOSE MOVEMENT

Toyohiko HAYASHI*, Sumie TANAKA*, Masato IKEZU*, Shin-ichi NAKAJIMA**,
Hiroshi KOBAYASHI***, Yoshiaki YAMADA****, Michio MIYAKAWA*****,
and Kiyoshi ISHIOKA*****

**Graduate School of Science and Technology, Niigata University*

***Department of Mechanical and Control Engineering, Niigata Institute of Technology*

****First Department of Prosthetic Dentistry, School of Dentistry, Niigata University*

*****Department of Oral Physiology, School of Dentistry, Niigata University*

******Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University*

******Professor Emeritus, Niigata University*

In order to clarify the control mechanism of jaw movements, we developed an autonomous jaw-movement simulator, JSN/1 D, which incorporates cable-tendon DC-servo actuators, simulating the masseter, temporalis, lateral pterygoid, and digastric muscles. The actuators were controlled adaptively under an impedance-control mechanism, utilizing data for biteforce, tooth contact, cabletension, and cablelength. In order to achieve more lifelike open-close movement on the simulator, we introduced a control hypothesis that during closing, the horizontal mandibular position is determined by antagonistic activities of the posterior portion of the temporalis muscles and the lateral pterygoid muscles.

This hypothesis was materialized by an impedance control for the posterior temporalis actuators and an antagonizing tension-control of the lateral pterygoid muscles. The actuators were activated in the following manner, so as not to contradict anatomical and physiological knowledge of the jaws. The masseter actuators were activated only during biting, in order to exert bite force. The anterior temporalis actuators under impedance control were solely responsible for determining the vertical position of the mandible during closing and supported the

masseter actuator during biting. During opening, the digastric and lateral pterygoid actuators were co-activated to lower the mandible. Both actuators were driven under tension control, due to the lack of the muscle spindles in corresponding muscles. At rest, all the actuators functioned as a weak elastic body like actual muscles.

Experimental results demonstrated that the aforementioned control scheme can produce a reproducible lifelike open-close movement on the simulator, while referential experiments with less activation of the α - γ linkage of the posterior temporalis control showed kinetic instability, particularly in the closing phase. All these suggest a possibility of stabilizing the mandible during closing through position control of the posterior temporalis muscles and antagonistic tension-control of the lateral pterygoid muscles. A single alternative to this control scheme is to employ an excessive co-activation of the two muscles to make the position of the mandibular head less compliant. This is hardly acceptable, however, because no such strong activities are observed in both muscles during closing.

Physiological validation of the proposed control scheme is a task that should be dealt with in a subsequent study.