

反射型光センサを用いた非接触咬合力推定システム

板橋孝典†¹ 正井克俊†¹ 杉浦裕太†¹ 杉本麻樹†¹

概要: 疲労やストレスなどの指標となる咬合力の推定は、医療分野やエンタテインメント分野での利用の関心が持たれている。一方で、咬合力を計測する場合は、口腔内に機材を入れたり、顔表面に貼り付けて利用するものが多く、日常的な環境下で長時間使用することには適していない。そこで本研究では、人間が顎に力を入れた際に咬筋の収縮に応じて、顔皮膚表面の変形が起こる現象に着目する。この変形を、反射型光センサで直接的な皮膚表面への接触なく咬筋の膨張収縮を計測し、咬合力を推定するシステムを開発する。

キーワード: ウェアラブルデバイス, 咬合力推定, 反射型光センサ, バーチャルリアリティ

Non-contact Bite Force Detection via Photo Reflective Sensors

Takanori Itabashi†¹ Katsutoshi Masai†¹
Yuta Sugiura†¹ Maki Sugimoto†¹

Abstract: The estimation of bite force, which can be an index of food texture or one's stress level, may be used in the medical field or for entertainment purposes. Current methods for estimating bite force often requires putting instruments into the mouth or attaching it on the face, which would not be suitable for long-term use. We focused on the deformation of facial skin which changes according to the expansion of the jaw muscles during jaw clenching. By using photo reflective sensors for measuring the expansion and contraction of jaw muscles, we developed a system which can estimate the bite force without any contact to the skin.

Keywords: Wearable Device, Bite Force Detection, Photo Reflective Sensors, Virtual Reality

1. 序論

咀嚼や噛み締め動作は人間の生活習慣や心理状態と、密接な関わりがある。この動作を計測することで、人間の状態を把握するための指標を得ることが可能である。その中でも、本研究は、人間がストレスや疲労を起因として生じる咀嚼や噛み締め行動に着目する。

本来、人間の上下の歯が接触している時間は1日で20分程度が正常[1]といわれている。無意識に上下の歯を噛み合わせる癖をブラキシズムと呼ぶが、特に睡眠時や集中時に起こりやすく歯の接触時間が長くなる原因となっている。上下の歯の接触時間が長くなると、筋肉の疲労や顎関節への負担が大きくなり、顎関節症など様々な障害を引き起こす。ブラキシズムを持つ人は全人口の6~20%に及ぶ[2]。ブラキシズムは上下の歯を接触させる力が大きく、噛む力が強い人ではおよそ70kgの力がある[3]。そのため、歯のすり減り、知覚過敏を引き起こすことがある。

また、ブラキシズムほど歯に強い力がかからないが、無意識に上下の歯を接触させてしまう歯列接触癖(TCH)と呼ばれるものがある。歯を接触させている間、顔周辺の筋肉を緊張させているため、肩こりや偏頭痛の原因となっている。ブラキシズム同様、無意識に行う癖であるため発見が難しい。このような歯にかかる力(以下、咬合力)を測

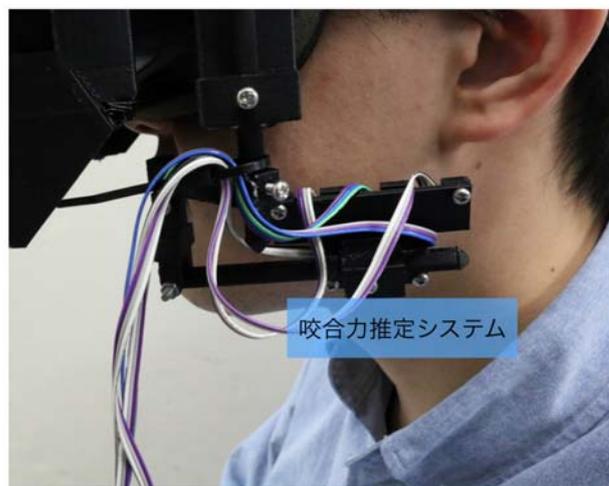


図1 咬合力推定システム
Figure 1 Bite Force Prediction System

定は、人間の健康状態を把握する上で重要である。

加えて、咀嚼や噛み締めは人間が日常的に行っている動作であり、咬合力を推定することはユーザインタフェースへの応用において重要である。これらの動作は顔付近の筋肉しか使用しないためハンズフリーでデバイスのコントロールをしたり、他者に気づかれない入力を行う手法として

†¹ 慶應義塾大学
Keio University

有効である。

咬合力を測定する簡便な方法は、口腔内に力センサを入れて、直接計測する方法が考えられるが、日常的に利用することは難しく、また衛生状態の管理も困難である。また筋電計測から推定する方法もあるが、皮膚に直接的に貼り付ける作業コストや、ノイズの影響が問題となる。

本研究は、簡便にユーザに着脱でき、また日常環境で指圧を測定可能なシステムの開発を目標にする。具体的には、複数の反射型光センサ（以下、フォトフレクタ）を利用して咬筋とその周囲の皮膚の動きから咬合力を推定する方法を提案する。フォトフレクタを使用することでセンサを直接身体に取り付けることなく使用することが可能である。これにより、長時間の使用や、着脱などが容易になり、本システムによって日常生活でのストレスの指標を得ることができる。また、ヘッドマウンテッドディスプレイ（以下、HMD）を用いてバーチャリアリティコンテンツを体験する際にも、噛み締め動作でタスクを選択する操作や噛み締めから推定されるストレスを可視化することを実現できる。

2. 関連研究

従来から咬合力を検知する研究は数多く実施されている。McAuliffe らの研究では圧力センサを搭載したプリントを口内に装着することで睡眠中のブラキシズムの検知を実現している[4]。実際に歯にかかる力を高い精度で直接センシングすることが可能である。一方で、口腔内に直接機器を入れる必要があるため、覚醒時の利用は難しい。また、筋電センサを用いてブラキシズムを検知する研究もおこなわれている。Edward らは、顔表面に筋電センサを貼り付けることにより咀嚼のモニタリングを行っている[5]。顔表面に装着するため口腔内に取り付けるよりは簡便に利用が可能である。一方で、皮膚に張り付ける作業コストや、HMD 等の視界が遮られる状況での使用には適していない。

非接触で人間の顔面の表面の変形状態から、人間の行動を推定する研究がある。宮内らは、視覚表現の中で物体の動きをベクトルとして抽出する手法であるオプティカルフローを利用してカメラから咀嚼の検知を行っている[6]。また、小泉らの Chewing Jockey という研究では、フォトフレクタを利用して顎の動きを取得し咀嚼の検知をしている[7]。一方でこれらは咬合力を推定することを目指しているものではない。

本研究は、日常環境での長時間利用を想定して、ユーザが簡便に着脱可能なシステムを開発することを目的としている。

3. 光センサによる咬合力推測

本システムは、顔表面までの距離を測定するセンサシス

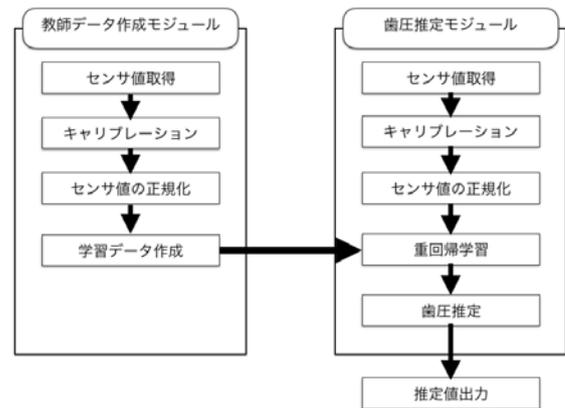


図 2 システム構成図

Figure 2 System configuration diagram

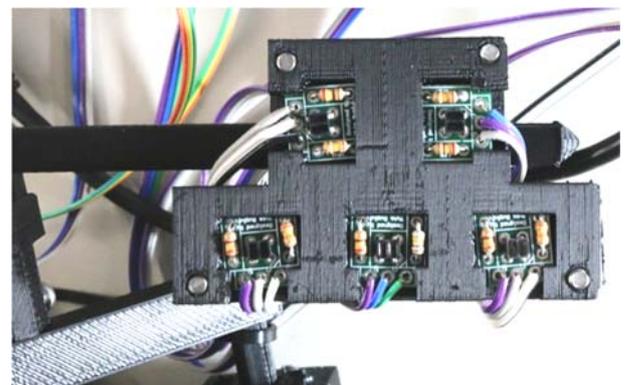


図 3 フォトリフレクタ部

Figure 3 Photo reflective sensor

テムと、計測された距離情報をもとに咬合力を推定するソフトウェアによって構成されている。センサシステムは、一つ一つが小型なフォトフレクタによって構成されているものであり、省電力での駆動が可能である。口腔内に装置を含んだり、皮膚に張り付ける手間がないため、日常的に着脱可能である。

3.1 システム構成

本システムの構成図を図 2 に示す。本システムは、教師データ作成モジュールと咬合力推定モジュールという二つのセクションがある。教師データ作成モジュールでは、フォトフレクタが取得したセンサから皮膚までの距離情報を正規化し、その瞬間の咬合力と対応する数値を保持したデータを作成し、目的変数として使用する。咬合力推定モジュールでは、回帰式を生成するために教師データ作成モジュールで取得したデータに対し回帰学習を行う。そして、入力されたセンサ値を正規化し回帰式に当てはめることで咬合力の推定を行う。

3.2 センサシステム

本研究では、5 個のフォトフレクタ（コーデンシ社製



図 4 加工した圧力センサ
 Figure 4 Pressure Sensor

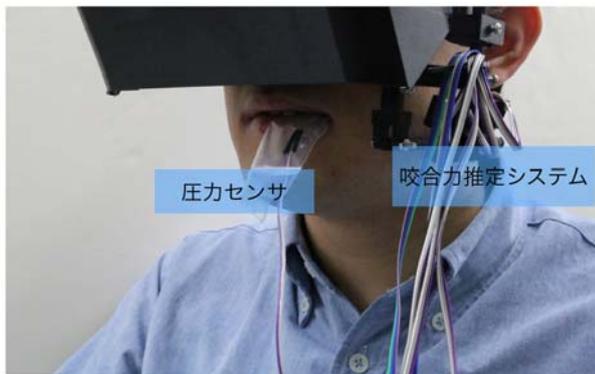


図 5 圧力センサと提案システムの比較実験
 Figure 5 Synchronization experiment
 with Pressure Sensor

SG-105)をセンサアレイ状に配置可能なモデルを作成した。これを用いて左の咬筋とその周囲を測定する。人間は顎に力を入れる際、下顎や頬も形状が変化するため、咬筋の膨張を含むその周辺の形状変化も記録する必要があるためである。図 3 に実際にフォトフレクタを配置したセンサシステムの様子を示す。本プロトタイプにおいてセンサアレイは Oculus Rift DK2 に取り付けた。また、咬筋の位置には個人差がでるため、ジョイント部はユーザが任意で動かすことを可能にし、各個人に対して調整ができるような設計にした。

3.3 咬合力推定ソフトウェア

本システムでは咬合力を推定するために機械学習を行っている。具体的な手法として、複数の目的変数を用いた回帰分析である重回帰分析を用いる。重回帰分析では回帰式を導き出すため、学習時に収集していない目的変数を入力したとしても、その回帰式を用いて説明変数を推定することが可能となる。そのため、コンピュータ上のソフトウェアでは、最初に教師データを作成して機械学習を行い、作成した学習モデルと入力された値を比較することで咬合力の推定を行う。

まず事前に計測したセンサ値を教師データとして重回帰モデルを作成する。顎に力を全く入れていない通常時を基準とし、噛み締めて強い歯圧がかかっている瞬間を最大

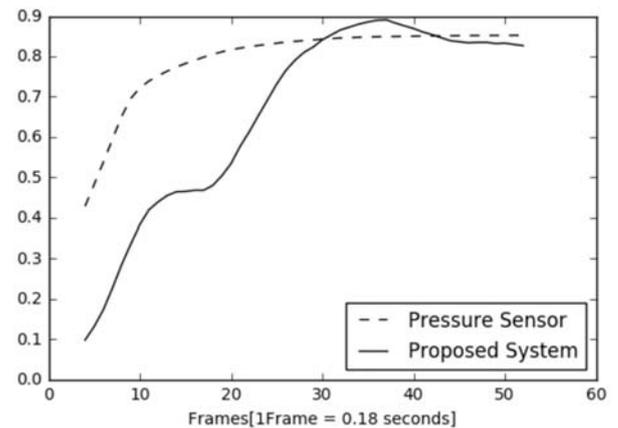


図 6 圧力センサによる値と推定値の遷移
 Figure 6 Change of the values estimated by our
 system and by the press sensor

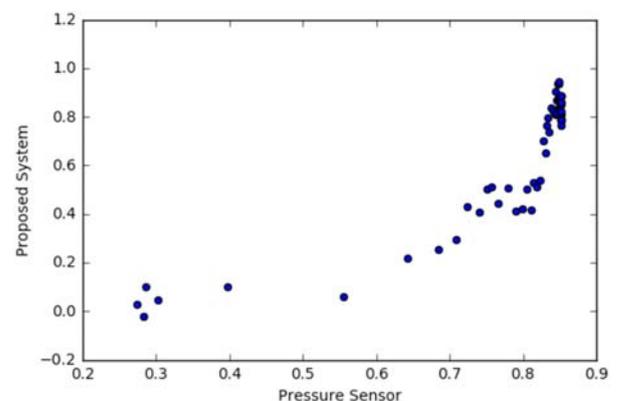


図 7 圧力センサによる値と提案システムの咬合力推定値の関係性

Figure 7 Relationship between the value estimated by proposed system and the value estimated by the press sensor

値、上下の歯が接触する程度の力を入れている瞬間を中間値、口が開いている状態を負の値として目的変数を設定する。学習の際は、センサ値の正規化を行うために顎を無造作に動かし、その際に取得したデータをもとにキャリブレーションする。システムを実行する時は、センサ値が取得する距離情報をもとに、作成した回帰式を用いて咬合力の推定をする。

4. 咬合力推定実験

4.1 実験手順

本システムは歯圧を推定することを目的としているため、実際の歯圧とシステムが推定した歯圧の関係性を知る必要がある。そこで、フィルムタイプの圧力センサ(FSR402)を利用して実際の歯圧を測定し、同時に本システムを利用した歯圧の推定を行うことで両方のデータを比較する。

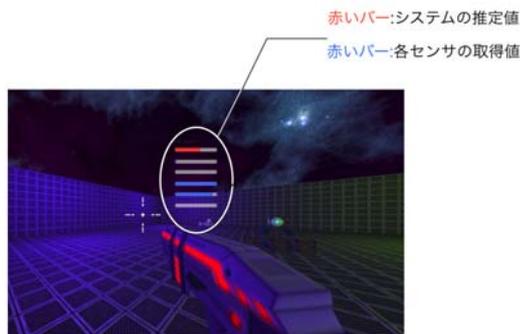


図 8 システムの応用例
Figure 8 Application example

実験の様子を図 5 に示す。圧力センサの値は正規化を行い最小値が 0, 最大値が 1 になるようにする。同様に、システムが推定する値も全く顎に力を入れていない状態を 0, 上下の歯を接触させている状態を 0.5, 食いしばった状態を 1 とし学習させた。実験は、顎に力を入れていない状態(開いている状態)から徐々に力を入れていき、噛み締めたところまでをデータとして取得する。

4.2 実験結果

フレーム毎の圧力センサの値と推定値の遷移を図 6 に示す。グラフより、圧力センサの値とシステムの推定値が噛み締めに従って上昇していることが確認できた。加えて、最も強く噛みしめた際は、圧力センサの値と推定値が平坦に遷移している。この変化は、図 7 に示す圧力センサの値と推定値の関係性をプロットしたグラフからも読み取ることができる。

5. アプリケーション

本提案システムを、バーチャルリアリティ環境での First Person Shooting Game 中のストレス計測に応用した。プレイヤーがゲーム中に、ブラキシズムや TCH の状態になっているかを常に画面の端に表示するようにしている。これにより噛み締めが癖になっている人であっても意識的に改善を促すことや、ゲーム中のストレスを可視化し、プレイヤーに提示することが可能である。ゲーム実行中の画面を図 8 に示す。赤いバーはシステムが推定している咬合力を示し右側を示すほど噛み締めをしていることを示す。青いバーは各センサの取得値を正規化したデータを示す。咬合力の可視化を行うことにより無意識に行っているブラキシズムや TCH に対してプレイヤーが意識的になると同時に自身にストレスがかかっているかどうかを判断が可能になると期待できる。

また、本システムを利用することで、ストレスのセンシングのみではなく、咬合力を利用した入力が可能になるため、ゲーム中の画面遷移や音楽などのコントロールを咀嚼や噛み締めを利用して行うことができるとも考えられる。

6. 今後の課題

本システムでは、計測センサとしてフォトフレクタを使用しているため、太陽など外部の赤外線の影響を強く受ける。今後、本システムを屋外でも使用可能にする上で、この課題を解決するためには、環境光の影響が少ないハードウェア設計や、変調処理を加える必要がある。また本稿では、HMD に一体型のハードウェアを作成したため、用途が限定的である。より汎用的な使用を実現するために、日常生活でも使用可能なハードウェアを設計することも今後の課題である。

7. おわりに

本稿では、日常環境下で咬合力を推定する手法として、複数のフォトフレクタにより咬筋周りの形状を非接触的に検出し、機械学習を用いて推定することを提案した。また HMD と一体型のハードウェアを装着した。さらに圧力センサで取得した実際の咬合力と比較をすることで本システムが咬合力を推定できていることを確認した。今後は、さらにデバイスの小型化や実生活での応用を目的としたハードウェアの改良を実施する。

参考文献

- [1] 遠藤優. 顎関節症に対する理学療法. 理学療法ジャーナル. 2015, 49 巻, 5 号, pp.411-417.
- [2] 山田好秋. ブラキシズムの生理学的背景. 顎機能誌. Jpn.Soc.Stomatognath.Funct.6:123-126,2000.
- [3] 高見沢忠, 健常永久歯の相対咬合力および個歯咬合力に関する研究. 日本補綴歯科学会雑誌. 1965, Vol. 9, No. 2, P 217-236.
- [4] P. MCAULIFFE*, J. H. KIM†, D. DIAMOND†, K. T. LAU† & B. C. O'CONNELL . A sleep bruxism detection system based on sensors in a splint – pilot clinical data. Journal of Oral Rehabilitation, 2014, Vol.42, pp.34–39.
- [5] Edward S, Sazonov, Member, IEEE, and Juan M. A Sensor System for Automatic Detection of Food Intake Through Non-Invasive Monitoring of Chewing. IEEE SENSORS JOURNAL, 2015, VOL. 12, NO. 5, pp.1340-1348.
- [6] 宮中大, 千葉優輝, 早川吉彦. オプティカルフローを用いた咀嚼回数のリアルタイム計測. 電子情報通信学会. IEICE Technical Report, IE2013-13, PRMU2013 -6, MI2013 -6 (2013-5).
- [7] Naoya Koizumi, Hidekazu Tanaka, Yuji Uema, and Masahiko Inami. Chewing jockey: augmented food texture by using sound based on the cross-modal effect. In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '11), 2011, Article No.21.