

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19828

研究課題名（和文）食後高血糖回避のための食事画像からの血糖値変化予測とAR・ナッジによる行動変容

研究課題名（英文）Blood glucose level prediction from meal photos and behavior change by AR and nudge for avoiding postprandial hyperglycemia

研究代表者

安本 慶一（Yasumoto, Keiichi）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：40273396

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、血糖値の時系列データと食事の情報から、個人ごとの血糖値予測モデルを構築し、摂ろうとしている食事により血糖値がどれだけ上昇するかを事前に予測する手法を開発した。また、配膳されている各食品に対して、ナッジにより血糖値が上がりにくい食べ方を誘発する手法を設計しその有効性を調査した。被験者10名から、血糖値の時系列データと血糖値に影響があるとされるデータ（食事情報、睡眠情報、被験者の身体情報）を収集し、血糖値予測モデルを構築し評価を行った結果、最も精度の高い被験者においてRMSE（二乗平均平方根誤差）は10.68、MAE（平均絶対誤差）は7.71となることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界の糖尿病人口は2045年までに約7億人に達すると予測されており、日本でも、糖尿病有病者と糖尿病予備軍は合計約2,200万人と推計されている。90%を占めるII型糖尿病の発症を予防するには、インスリンが分泌されても正常に働かない「食後高血糖」の状態になるのを避ける必要がある。本研究は、食後高血糖の状態を食事を摂取する前に高い精度で予測する技術、さらに、目の前の食事をどの程度食べても良いかを分かりやすく提示する技術を開発し、被験者実験によりその有用性を示した点で、学術的・社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method was developed to predict in advance how much blood glucose levels would increase with the meal about to be consumed, by constructing a blood glucose prediction model for each individual based on time-series data on blood glucose levels and dietary information. In addition, a method was designed to induce a way of eating that is less likely to raise blood glucose levels by means of nudges for each food served, and its effectiveness was investigated. A blood glucose prediction model was constructed and evaluated by collecting time-series data on blood glucose levels and data that were considered to influence blood glucose levels (dietary information, sleep information and physical information of the subjects) from 10 subjects, and the results showed that the RMSE (root mean square error) and MAE (mean absolute error) for the most accurate subjects were 10.68 and 7.71 in the most accurate subjects.

研究分野：ユビキタスコンピューティング

キーワード：血糖値予測 食事摂取量推薦 高血糖抑制 ナッジ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では、生活習慣の欧米化に伴い、生活習慣に起因する疾患である II 型糖尿病の有病率が高くなっている。II 型糖尿病は、遺伝素因と環境因子が関与する多因子疾患であり、糖尿病になりやすい遺伝素因に、肥満、過食、運動不足、ストレスなどの環境因子が加わって発症に至り、日本人の糖尿病患者の 90%以上を II 型糖尿病が占めている。厚生労働省から 2017 年に発表された「平成 28 年国民健康・栄養調査」によると、「糖尿病を強く疑う者」は約 1,000 万人と、前回調査が行われた 2012 年から約 50 万人増加している。「糖尿病の可能性を否定できない人」も約 1,000 万人に達し、糖尿病及び糖尿病予備軍を合わせると、日本国民の 5 人に 1 人がこれに該当することから、糖尿病の発症予防が必要不可欠といえる。糖尿病になる前の段階である「糖尿病予備軍」において、食事から 2 時間後の血糖値が下がらない状態である「食後高血糖」は、糖尿病判定において重要な指標となっている。しかし、通常、食事抜きで行われる健康診断では、食後高血糖が検知されにくく、糖尿病が進行した状態でなければ空腹時の血糖値は病気のレベルまで上がらない。そのため、糖尿病予備軍や糖尿病初期の場合、診断から漏れてしまう可能性が非常に高い。以上より、食事前に、それを食べた後の血糖値の上昇を予測し、なんらかの方法で行動変容を誘発できれば、食後高血糖を回避できる可能性があると考えられる。

既存研究として、糖尿病患者を対象に、血糖モニタ、代謝率モニタおよびそれらを接続した計算機上から入力したデータに対してデータマイニングを行い、推定モデルを構築することによって翌朝の血糖値を 90%以上の精度で推定するものや、エネルギー摂取と消費のバランスの監視のための、消費カロリー推定システム、フォロプレスチモグラフ (PPG) と機械学習を用いることで、血糖値および血圧の収縮期・拡張期を 87.7%の精度で非侵襲的に推定し、さらにこの手法を応用し、血糖値を正確かつ非侵襲的に推定するものがあつた。しかし、これら既存研究は、血糖値の予測がある程度可能であるが、これから摂る食事に対して、血糖値がどれくらい上昇するかを予測する用途に使えず、また、予測に基づいて人が食事を自発的に制御可能にする効果的な方法は提案されていなかった。

### 2. 研究の目的

食後高血糖（食事 2 時間後の血糖値が下がらない状態）が頻繁に起こると II 型糖尿病を引き起こす危険性が高いと言われている。本研究では、血糖値の時系列データと食事の情報から、個人ごとの血糖値予測モデルを構築し、(1) 摂ろうとしている食事により血糖値がどれだけ上昇するかを事前に予測する手法を開発する。また、高血糖状態を避ける食行動の行動変容手法として、(2) 配膳されている各食品に対して、食べて良いかどうか、どの程度なら食べても良いかを、AR（拡張現実感）等により提示する手法、(3) ナッジにより血糖値が上がりにくい食べ方を誘発する手法を設計しその有効性を調査する。上記を実現するため、(i) 画像からの食事種類・量の推定、(ii) 血糖値の推定モデルの構築、(iii) 行動変容に向けた食品・量の推薦手法、(iv) アプリケーション、(v) ナッジ、の研究開発項目を実施し、被験者による実証実験により有効性を示す。

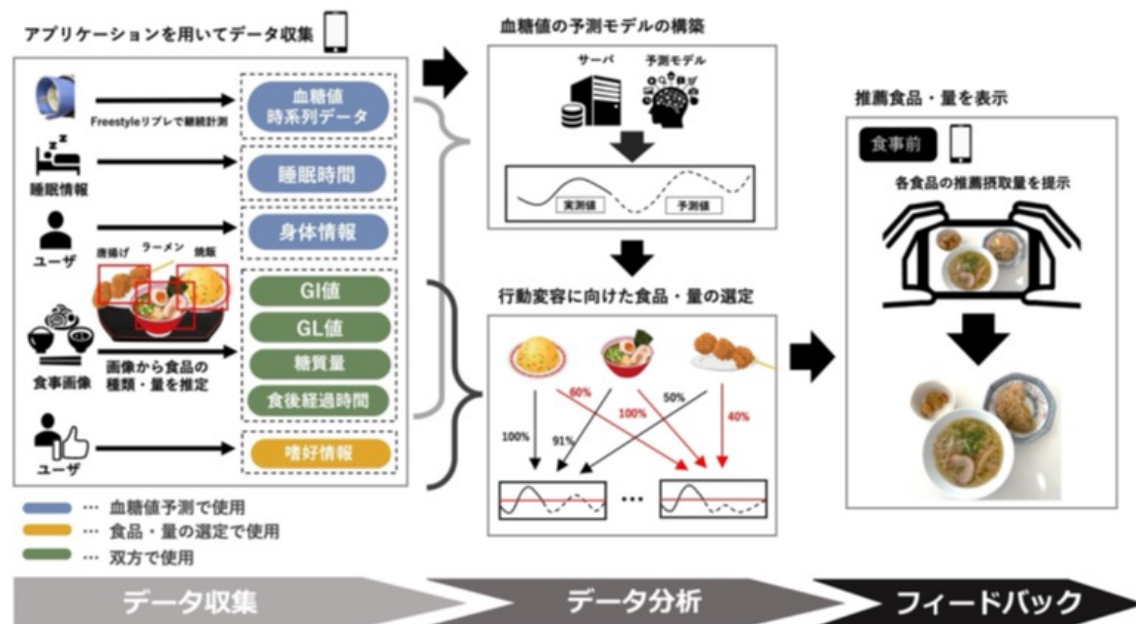


図 1 食後高血糖予防フレームワーク

### 3. 研究の方法

本研究で実現する食後高血糖予防フレームワークの全体像を図 1 に示す。提案フレームワークでは 1) データ収集, 2) データ分析, 3) フィードバックから構成される。データ分析では、収集したデータから血糖値の予測モデルを構築後、行動変容に向けた食品・量の選定を行う。

### 1) データ収集

先行研究において、血糖値には食事の摂取、BMI、ストレス、炭水化物摂取量、睡眠時間、身体活動、病気の有無、投薬、喫煙習慣、アルコール依存症、アレルギーなどが影響を与えることが報告されている。本フレームワークでは、データ収集用に開発したアプリケーションを用いて、血糖値、食事情報（食事画像や食事の開始・終了時刻）、睡眠情報（就寝および起床時間）、およびユーザ情報（身長・体重）を収集する。

血糖値データの収集において、CGM デバイスである FreeStyle リブレおよびセンサデータを Bluetooth を介してスマートフォンに送信可能な BluCon を用いて継続的に取得する。FreeStyle リブレは 24 時間連続で 2 週間の血糖値データを収集することができる。BluCon は FreeStyle リブレの血糖値データを NFC (近距離無線通信) で取得し、BLE でデータを送信することができるデバイスとなっており、5 分単位で自動的にデータ収集が可能である。

### 2) データ分析

図 1 (中央上) のデータ分析では、収集したデータから食事 2 時間後の血糖値を予測するモデルを構築する。先行研究では、食事中に摂取する食材ごとの糖質量に合わせた食後血糖値の上昇を示す指標である GL 値と食後数十分後の予測血糖値を特徴量に使用することで、血糖値の予測精度が向上している。本研究も同様の手法を用いて個人の血糖値予測モデルを構築する。

図 1 (中央下) のデータ分析では、食後高血糖回避のための食品・量を選定する。個人の血糖値予測モデルと入力された食事画像データから、食品を全て食べた際に食後高血糖が発生すると予測した場合、各食品の摂取量を減らすことで、血糖値の上昇を抑える。簡単かつ短時間で算出する推薦摂取量の算出方法として、以下に示す 4 つの推薦摂取量算出方式を提案する。

#### 品目数優先法

品目数優先法では、GL 値が最も高い食品から順番に各食品の摂取量を 5% ずつ減らす。

#### 摂取量優先法

GL 値が最も高い食品から摂取量を 5% ずつ減らし、減らした食品の摂取量が 0% になった場合、次に GL 値が高い食品の摂取量を減らす工程を繰り返す。

#### 嗜好優先法

各食品に対して全ての値を足した場合に 100 となる嗜好度が与えられており、各食品の嗜好度に対する食後血糖値上昇度を算出し、単位嗜好度あたりの食後血糖値上昇度が最も高い食品の摂取量を 5% ずつ減らす。減らした食品の摂取量が 0 % になった場合、次に単位嗜好度あたりに対する食後の血糖値上昇度が高い食品の摂取量を減らす工程を繰り返す。

#### バランス型嗜好優先法

嗜好優先法と同様に、単位嗜好度あたりに対する食後の血糖値上昇度が最も高い食品の摂取量を 5% ずつ減らす。減らした食品の摂取量が閾値以下になった場合、次に単位嗜好度あたりに対する食後の血糖値上昇度が高い食品の摂取量を減らす工程を繰り返す。

### 3) フィードバック

図 1 (右) にあるフィードバックでは、食品と量の選定結果をデータ収集に使用したアプリケーションを用いて可視化する。配膳された食事をスマートフォンで撮影することで、食後高血糖を予防する摂取量の画像を生成して表示する。画像を生成する際は、セマンティックセグメンテーション手法を用いて、ユーザが入力した画像を table, plate, food の 3 つのクラスに分割し、food クラスの部分のみをマスクする。画像上のマスクされた領域を再構成する技術である Image Inpainting を用いて、マスクした食事画像から、各食品の推薦摂取量を適用した画像を生成する。

## 4. 研究成果

### 1) 血糖値予測モデルの精度

本実験では、先行研究の特徴量に加え、GL 値と食事 30, 60, 90 分後の予測血糖値を新たな特徴量として使用し、血糖値の予測精度向上に効果があるのかを確認する。約 2 週間、非糖尿病患者である成人男性 10 人を対象に、食事情報をはじめとする血糖値に影響のあるデータを収集し、特徴量を抽出する。抽出した特徴量を用いて個人ごとの血糖値予測モデルを構築し、モデルの精度を評価した。被験者には、調査票配布時に、本研究の目的と方法および調査参加者への倫理的配慮について、口頭と文書による説明を行った。本研究は、奈良先端科学技術大学院大学の倫理委員会承認のもと実施した。(承認番号: 2019-M-2-1)

被験者 10 名に Freestyle リブレを装着してもらい、リアルタイムな血糖値データを収集しながら、食事内容、睡眠時間を本研究で開発したアプリケーションを使って 2 週間にわかり入力してもらう。Freestyle リブレは、センサ装着している間 15 分単位で血糖値を自動的に収集する。食事情報の収集では、食事画像から料理名や糖質量、カロリーを算出し、受信した画像は自動的に送信時間がラベリングされる。ラベリングされた時間を食事開始時間とする。また、GI 値の算出には GI 値データベースであるシドニー大学の Search for the Glycemic Index を使用する。これまでの特徴量に加え、新たな特徴量として、GL 値と食事 30, 60, 90 分後の予測値を使用し、2 時間後の血糖値を予測するモデルの精度を比較する。

機械学習モデルの選定では、食事 2 時間後の血糖値を予測するため、抽出した特徴量に対して、回帰モデルの教師あり学習を適用した。回帰モデルには、代表的な 4 種類の機械学習アルゴリズム (Linear Regression, Support Vector Regression (SVR), RandomForest, LightGBM) を採用した。評価方法では、RMSE と MAE で評価した。また、本研究では、血糖値データが 15 分間隔で約 2 週間自動収集されることから、1 日ごとのデータはほとんど均等であるため、Leave-One-Day-Out 法を用いて交差検証を行なっている。

表 1 にモデルの選定結果を示す。予測モデルは Linear Regression を用いた際に平均絶対誤差が 11.619 となり、最も精度が高くなる結果となった。Linear Regression のモデルの精度が一番高い結果に対する考察としては、データが少ない状況の場合、複雑なモデルが過学習するリスクが高まるため、線形回帰のようなサンプルで計算効率の高いモデルの方が高い精度になると考えられる。

新たな特徴量を加え、収集したデータを基に構築した血糖値予測モデルによる結果を表 2 に示す。

表 2 では、新たな特徴量として提案した GL 値と食事 30, 60, 90 分後の予測値を使用したモデルと使用しなかったモデルの精度評価とその差分を括弧内に示している。各被験者の予測モデルを評価した結果、全被験者において、新たな特徴量を使用した予測モデルの方が使用していない場合と比較して精度が向上した。特に被験者 H のモデル精度が最も高く、RMSE は 10.68, MAE は 7.71 となった。

表 1 機械学習モデルごとの推定誤差

Model	RMSE	MAE
Linear Regression	15.697	<b>11.619</b>
Support Vector Regression	15.860	11.747
Random Forest	16.395	12.357
Light GBM	17.269	13.040

表 2 被験者ごとの血糖値推定誤差

被験者	特徴量追加前		特徴量追加後	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
A	18.891	14.231	16.909 (-1.982)	12.262 (-1.969)
B	14.036	11.200	12.369 (-1.667)	9.701 (-1.499)
C	14.656	10.743	14.309 (-0.347)	10.248 (-0.495)
D	24.240	19.356	22.093 (-2.147)	16.996 (-2.360)
E	22.708	17.074	21.721 (-0.987)	15.976 (-1.098)
F	15.226	11.577	13.807 (-1.419)	10.053 (-1.524)
G	16.089	11.906	14.193 (-1.896)	10.167 (-1.739)
H	11.946	9.308	10.679 (-1.267)	7.711 (-1.597)
I	16.245	13.329	13.573 (-2.672)	10.493 (-2.836)
J	19.657	15.359	17.325 (-2.332)	12.574 (-2.785)
平均	17.369	13.408	15.697	11.619

## 2) フィードバック方法の効果

本実験では、各食品に推薦摂取量を適用する前後の食事の満足度を Yahoo!クラウドソーシングを用いて評価した。本実験では、目的とする推薦摂取量を適用した食事の満足度を評価するため、各算出方式を用いて推薦摂取量を算出し、実際に用意した食事に適用した食事画像をユーザに提示する。本実験で使用した食事画像と各食品の GL 値を図 2 に示す。

用意した食事量とユーザの普段の食事量の差を乖離させないため、本実験を行う前にユーザの選定を行った。Yahoo!クラウドソーシングを用いて 2,000 人を対象に、日常における食事量と図 2 の各食品の好みに回答するタスクを実施した。食事量のタスクでは、食事量を 3 段階 (ラーメン 1 人前 (麵 200g), ラーメン定食 (麵 200g・唐揚げ 4 個), ラーメン定食 (麵 200g・唐揚げ 4 個・チャーハン 200g)) に分けた食事画像を提示し、1 食分の食事量を選択してもらうタスクを実施した。用意した食事画像と同等量を普段から食べているユーザを対象とするため、1 食分の食事量でラーメン 1 人前を選択したユーザのデータはすべて破棄した。各食品の好みに関するタスクでは、図 2 の中から提示される食事画像の各食品を好みの順にランキング付けするタスクを実施した。

最終的に選定した 284 人に対し、各算出方式の好みと推薦摂取量を適用した食事の満足度を回答するタスクを実施した。推薦摂取量は、各食事における総 GL 値の 80%以下の場合、食後高血糖の発生を予防可能という条件の下、各算出方式により推薦摂取量を算出した。また、バランス型嗜好優先法では、閾値を 40%に設定し、各食品が 40%以上となるよう設定している。

クラウドソーシングでは、各算出方式の好みに回答するタスク (1) と、推薦摂取量を適用した食事の満足度に回答するタスク (2) の 2 つを実施した。タスク (1) では、図 3 (左) に示すような推薦摂取量を適用した食事画像を 4 枚表示した上で、食事制限を推奨された場合、どの算出方式




用意した食事	食品	GL値
	ラーメン	47.9
	チャーハン	62.1
	唐揚げ	5.4
	とんかつ	4.5
	白米	50.3
	味噌汁	0.5
	千切りキャベツ	0.9
	カレーライス	94.9
	とんかつ	3.4
	ポテトサラダ	5.7

図 2 各食事に含まれる食品と GL 値

が好みかをランキングで回答するタスクを実施した。タスク(2)では、図3(右)に示すような推薦摂取量を適用する前後の食事画像を1枚ずつ提示し、推薦摂取量適用前の食事画像の満足度を10点とした場合、推薦摂取量を適用後の食事の満足度を11段階で回答するタスクを12枚の画像が終わるまで実施した。



図3 推薦摂取量を適用した食事画像(左)と推薦摂取量適用前後の食事画像(右)

ユーザが選択した好みの算出方式を適用した食事の満足度結果を図4に示す。タスク(2)の回答において、12問全ての満足度が同じ場合には、回答としての信頼がないとして、そのユーザのデータはすべて破棄している。図4には、タスク(1)で1番好みである算出方式を選択した際の満足度の平均と標準偏差を色別に示している。グラフの結果から、食事の内容に依存せず、最も満足度の高い算出方式で満足度7以上の評価が得られた。しかし、どの食事においても、嗜好優先法の満足度が、他の算出方式と比較して低くなる傾向が見られ、特に、とんかつ定食とカツカレー定食はラーメン定食と比較して、満足度が低くなる結果となった。この要因として、とんかつ定食とカツカレー定食に嗜好優先法を適用した場合、用意された品目のうち2品全部を制限する必要があったからである。また、全食事において、嗜好優先法と比較してバランス型嗜好優先法の満足度が高くなった。この要因として、GL値の高い食品を数%制限するだけで、GL値の低い食品が数十%多く食べることができるからと考えられる。以上より、「食べ物の好き嫌い」という観点に基づく食事の減らし方だけでなく、「摂取量の多い少ない」という観点における食事の減らし方が、食事の満足度を考えるうえで重要であるという知見が得られた。

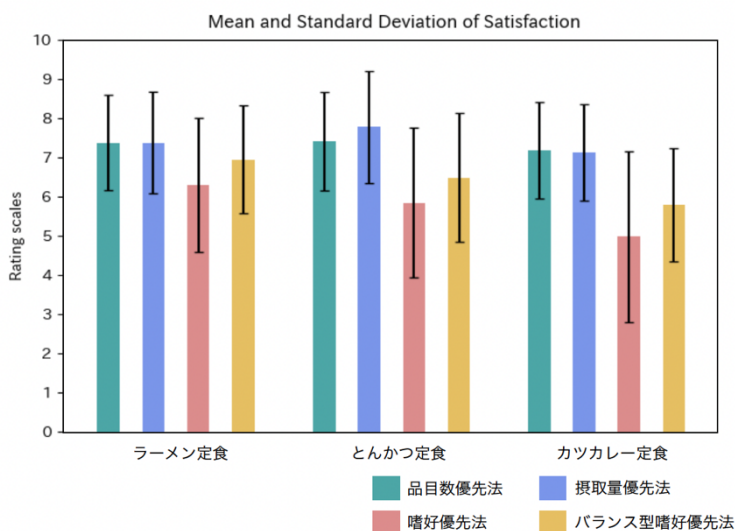


図4 各推薦方式の適用結果

以上の成果は、IEEE EMBC2023、電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI)、情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ等で発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kanta Matsumoto, Tomokazu Matsui, Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto	4. 巻 23
2. 論文標題 Stress Estimation Using Biometric and Activity Indicators to Improve QoL of the Elderly	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23010535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kakaya Zhang, Yuki Matsuda, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto	4. 巻 218
2. 論文標題 Movement Recognition via Channel-Activation-Wise sEMG Attention	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Methods	6. 最初と最後の頁 39-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymeth.2023.06.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 道浦菜々子, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一
2. 発表標題 ユーザ嗜好と血糖値を考慮した高血糖抑制支援システムの実現と評価
3. 学会等名 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究専門委員会(SeMI)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中岡黎, 大井一輝, 尾崎麻希, 三崎慎也, 中村優吾, 松田裕貴, 諏訪博彦, 眞野智生, 城戸顕, 安本慶一
2. 発表標題 手指の機能障害に対する客観的評価確立に向けた箸型センサを用いた巧緻動作認識手法の検討
3. 学会等名 社会システムと情報技術研究ウィーク（WSSIT '22）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道浦菜々子, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一
2. 発表標題 ARとナッジを用いた高血糖抑制のための食事行動変容システムの検討
3. 学会等名 2022年度 情報処理学会関西支部 支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道浦菜々子, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一
2. 発表標題 食後高血糖予防のための推薦摂取量算出方式の満足度評価
3. 学会等名 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究専門委員会 (SeMI)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 道浦菜々子, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一
2. 発表標題 血糖値予測精度向上に向けたデータ分析と摂食速度の影響調査
3. 学会等名 第31回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nanako Michiura, Yuki Matsuda, Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto
2. 発表標題 A self-management system for preventing hyperglycemia through blood glucose level prediction and nudge-based food amount reduction
3. 学会等名 The 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果について、以下の4件の受賞があった。

- ・2022年度 情報処理学会関西支部 支部大会 学生優秀発表賞：道浦菜々子：ARとナッジを用いた高血糖抑制のための食事行動変容システムの検討
- ・センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI) 2022年度若手研究奨励賞：道浦菜々子：ユーザ嗜好と血糖値を考慮した高血糖抑制支援システムの実現と評価
- ・センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI) 2022年度優秀発表賞：道浦菜々子：ユーザ嗜好と血糖値を考慮した高血糖抑制支援システムの実現と評価
- ・道浦菜々子，松田裕貴，諏訪博彦，安本慶一：“優秀プレゼンテーション賞，”第31回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2023)，富山県高岡市，2023.

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------