

令和 5 年 4 月 18 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18106

研究課題名（和文）多波長分光計測に基づく遠隔血糖値計測に適した波長帯域の探索

研究課題名（英文）Identification of suitable wavelength bands for remote blood glucose sensing based on multi-wavelength spectroscopy

研究代表者

大岩 孝輔 (Oiwa, Kosuke)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20781032

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多波長分光計測により遠隔血糖値計測に適した波長帯域を探索し、その波長域にて遠隔的に計測した顔画像に基づく血糖値推定を行った。2021年度では、可視・近赤外・赤外帯域で計測した顔画像に基づく血糖値推定精度の比較を行った結果、近赤外帯域で計測した顔画像に基づく血糖値推定精度が高かった。2022年度では、近赤外帯域の中でも第1近赤外光学窓と第2近赤外光学窓で計測した顔画像に基づく血糖値推定精度の比較を行った結果、第1近赤外光学窓で計測した顔画像に基づく血糖値推定精度が高かった。以上より、多波長分光計測により遠隔血糖値計測に適した波長帯域は第1近赤外光学窓であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた遠隔血糖値計測に適した波長帯域は近赤外帯域の中でも第1近赤外光学窓であることが示唆された結果は、既存研究では実施されていない遠隔血糖値センシング手法の実現に繋がり、学術的意義があると考えられる。さらに、本研究の成果は従来の侵襲的な血糖値計測手法に代わる新奇的な血糖値計測手法の開発・実現に繋がり、血糖値計測におけるQOLの向上や持続的な血糖値モニタリングの実現が期待できるため、社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：The aims of this study are to identify the wavelength band suitable for remote blood glucose measurement by multi-wavelength spectroscopy and to estimate blood glucose levels using facial images measured in the identified wavelength band. In the first year, a comparison of estimation accuracy of blood glucose levels based on facial images measured in visible, near-infrared, and infrared bands was performed. As a result, the accuracy based on facial images measured in the near-infrared band was the highest. In the last year, a comparison of estimation accuracy of blood glucose levels based on facial images measured in the first near-infrared region and the second near-infrared region was performed. As a result, the accuracy based on facial images measured in the first near-infrared region was higher. These results suggested that the wavelength band suitable for remote blood glucose measurement is the first near-infrared region.

研究分野：生体医工学

キーワード：遠隔血糖値計測 多波長分光計測 近赤外帯域 第1近赤外光学窓

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

血糖値モニタリングは糖尿病患者にとって欠かせない。さらに、健常者においても血糖値が急変する血糖値スパイクが問題視されている。そのため、日常生活における血糖値モニタリングが必要不可欠である。従来の血糖値計測法は、穿刺・採血を伴い侵襲的であるため血糖値モニタリングの実現の弊害となっていた。

近年、穿刺・採血を伴わない接触生体計測に基づく低侵襲的な血糖値計測の研究が行われている。中には、生体組織に対する光の深達度が光の波長により変化することに着目し、可視・近赤外光を併用し様々な深さの生体情報を取得する多波長計測を活用することで、比較的高精度な血糖値計測を実現した先行研究がある (Rachim *et al.*, *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2019)。しかし、その手法では計測機器を装着・接触させる必要があり、被計測者が計測時にストレスを感じるケースも少なくないため、血糖値モニタリングの実現への課題が残されたままであった。

一方、我々は遠隔で計測可能な心臓血管系指標である顔色や皮膚温の情報を含む可視・近赤外・赤外帯域で計測した多波長分光顔画像から空間特徴量を抽出、それらの特徴量に基づく遠隔血糖値推定を実現した (Oiwa *et al.*, *IEEE Sensors Journal*, 2021; Oiwa *et al.*, *Artificial Life and Robotics*, 2018)。この成果は、多波長分光顔画像に基づく遠隔的な血流動態や血液成分のセンシングの実現可能性を示唆した。

遠隔的に血糖値が計測できれば、血糖値モニタリングの実現だけでなく、血糖値計測における QOL の向上も期待できる。先行研究で示された多波長計測に基づく血糖値計測の可能性と我々の多波長分光顔画像に基づく研究成果より、多波長分光顔画像により遠隔的に血糖値を計測できるのではないかと考えた。その実現には、遠隔で血糖値を計測するのに適した波長域を明らかにしなければならない。

### 2. 研究の目的

本研究では、多波長分光計測により遠隔血糖値計測に適した波長域を探索し特定することを目的とする。さらに、特定した波長域で計測した顔画像に基づく遠隔血糖値推定精度を評価する。

### 3. 研究の方法

本研究では以下の2つの検討を実施した。

#### (1) 可視・近赤外・赤外帯域で計測した多波長分光顔画像に基づく波長域探索

本検討では、可視・近赤外・赤外帯域のうちどの帯域が遠隔血糖値計測に適した波長域であるのか探索することを目的とする。具体的な研究アプローチは以下の通りである。

はじめに、意図的に血糖値を変化させた状態で可視・近赤外・赤外帯域における多波長分光顔画像と参照血糖値を計測する実験を実施した。この計測実験を9時、10時、11時、12時、13時、14時、17時、18時、19時、20時、21時、22時に実施し、9時と10時、12時と13時、18時と19時に実施する実験の間に血糖値を変動させるべく食事時間を設けた。多波長分光顔画像の計測では、可視カメラを用いて可視帯域における顔画像(顔面可視画像)を、近赤外線 Si カメラを用いて近赤外帯域における顔画像(顔面近赤外画像)を、赤外線サーモグラフィカメラを用いて赤外帯域における顔画像(顔面赤外画像)をそれぞれ計測した。ただし、顔面近赤外画像を計測する際に、被験者の顔面に波長が760-1100nmの近赤外光を照射し、顔面皮膚の散乱光を計測した。実験の被験者は健常成人男性2名である。

次に、実験で計測した顔面可視画像・顔面近赤外画像・顔面赤外画像のそれぞれから空間特徴量を抽出した。空間特徴量の抽出にはブライント信号源分離アルゴリズムの1つである独立成分分析アルゴリズムを用いた。各時間の実験で計測した多波長分光顔画像に独立成分分析アルゴリズムを適用すると、空間特徴量に相当する独立成分とそれらに対応する重み時系列が得られる。多波長分光顔画像より得られた空間特徴量の中には、血糖値変動に関連する空間特徴量の他、外光による輝度変動など血糖値変動に関連しない空間特徴量も含まれることが予想される。多波長分光顔画像より血糖値変動に関連する空間特徴量を分離・抽出すべく、独立成分の重み時系列を説明変数、実験で計測した参照血糖値の時系列を目的変数とした多変量解析を行った。多変量解析において変数選択手法を適用することで、目的変数である参照血糖値の時系列の説明に寄与する独立成分の重み時系列を選定した。

選定された独立成分の重み時系列に基づき、重回帰分析により血糖値推定モデルを構築した。ただし、本検討では被験者ごとのモデルである個人モデルを構築した。個人モデルによる血糖値推定精度に関する評定値は、自由調整済み決定係数(以下、 $R^2$ と略記する)および、参照血糖値と推定血糖値との二乗平均平方根誤差(Root mean square: 以下、RMSEと略記する)とした。

#### (2) 近赤外波長域における遠隔血糖値計測に適した波長域探索

(1)の検討の結果、顔面近赤外画像の空間特徴量に基づく血糖値推定精度が高く、近赤外帯域が遠隔血糖値計測に適した波長域であることが示唆された(4.研究成果を参照)。近赤外帯域は「生体の窓」と呼ばれるように生体組織に対する光の深達度が高いことが知られているが、

中でも波長が 700-1000nm の帯域は第 I 近赤外光学窓（以下，NIR-I と略記する），波長が 1000-1400nm の帯域は第 II 近赤外光学窓（以下，NIR-II と略記する）と呼ばれている。NIR-II の方が NIR-I に比べ光の深達度が高いことが知られており，その波長域で計測した顔画像の利用で血糖値推定精度の向上が期待できる。しかし，(1) の検討では NIR-II を含めずに遠隔血糖値計測に適した波長域の探索を実施していた。本検討では，NIR-I および NIR-II において遠隔血糖値計測に適した波長域を探索することを目的とする。具体的な研究アプローチは以下の通りである。

はじめに，意図的に血糖値を変化させた状態で NIR-I および NIR-II における顔画像と参照血糖値を計測する実験を実施した。意図的に血糖値を変動させるべく被験者にブドウ糖液を服用してもらい，ブドウ糖液服用後の被験者の顔画像と参照血糖値を 5 分ごとに計測した。顔画像の計測では，被験者の顔面に波長が 760-1100nm の近赤外光と波長が 1050-1650nm の近赤外光をそれぞれ照射し，顔面皮膚の散乱光を近赤外線 Si カメラと近赤外線 InGaAs カメラを用いて計測した。ただし，近赤外線 Si カメラで計測した波長が 760-1100nm の散乱光の画像を NIR-I で計測した顔画像，近赤外線 InGaAs カメラで計測した波長が 1050-1650nm の散乱光の画像を NIR-II で計測した顔画像とした。実験の被験者は健常成人男女 12 名である。

実験で計測した NIR-I および NIR-II で計測した顔画像に対し (1) の手法と同様に独立成分分析アルゴリズムを適用することで独立成分とそれらに対応する重み時系列を取得し，独立成分の重み時系列を説明変数，実験で計測した参照血糖値の時系列を目的変数とした多変量解析により参照血糖値の時系列を説明しうる独立成分の重み時系列を選定した。

選定された独立成分の重み時系列に基づき，重回帰分析により血糖値推定モデルを構築した。ただし，本検討では被験者ごとのモデルである個人モデルを構築し，個人モデルによる血糖値推定精度に関する評定値は参照血糖値と推定血糖値との RMSE とした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 可視・近赤外・赤外帯域で計測した多波長分光顔画像に基づく波長域探索

被験者 2 名において重回帰分析における標準偏回帰係数が最大となった顔面可視・近赤外・赤外画像より抽出された空間特徴量を図 1 に示す。ただし，図中の可視（赤）・可視（緑）・可視（青）はそれぞれ顔面可視画像の赤・緑・青色成分から抽出された空間特徴量を示す。また，標準偏回帰係数が最大となる空間特徴量は，目的変数である参照血糖値の説明に最も寄与する空間特徴量であると見なされる。さらに  $R^2$  および RMSE を表 1 に示す。図 1 の結果，顔面赤外画像より抽出された空間特徴量において，特に鼻部の特徴量が大きかった。顔面近赤外画像より抽出された空間特徴量において，顔面全体の特徴量が大きかった。顔面可視画像の赤・緑成分より抽出された空間特徴量において，目の下の特徴量が大きく，顔面可視画像の青色成分より抽出された空間特徴量において，顎の輪郭付近の特徴量が大きかった。表 1 の結果，顔面近赤外画像より抽出された空間特徴量に基づくモデルの  $R^2$  が両被験者において高かった。RMSE について，顔面可視画像より抽出された空間特徴量に基づくモデルにおける RMSE は，被験者 A では顔面近赤外画像より抽出された空間特徴量に基づくモデルにおける RMSE と同等である一方で，被験者 B では顔面近赤外画像より抽出された空間特徴量に基づくモデルにおける RMSE よりも大きかった。顔面赤外画像より抽出された空間特徴量に基づくモデルにおける RMSE は両被験者で大きかった。

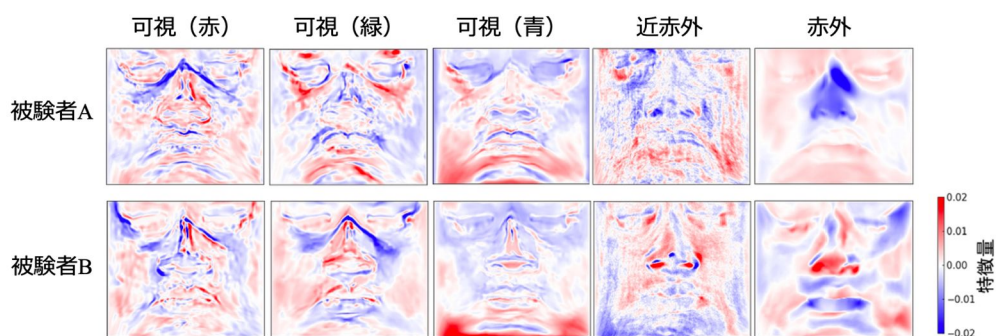


図 1 標準偏回帰係数が最大となった顔面可視・近赤外・赤外画像より抽出された空間特徴量

表 1 自由調整済み決定係数 ( $R^2$ ) および二乗平均平方根誤差 (RMSE)

		可視 (赤)	可視 (緑)	可視 (青)	近赤外	赤外
被験者 A	$R^2$	-0.040	0.546	0.536	0.523	0.618
	RMSE[mg/dL]	28.16	17.94	15.13	16.11	15.06
被験者 B	$R^2$	0.274	0.486	0.262	0.257	0.283
	RMSE[mg/dL]	15.96	12.94	16.65	16.71	15.28

以上の結果に対する考察を行う。顔面赤外画像より抽出された空間特徴量において特に鼻部の特徴量が大きかったことについて、顔面赤外画像は顔面皮膚温の情報を含むが、鼻部皮膚温は生理心理状態により変動することが知られている。鼻部に表出した空間特徴量は、血糖値に関連するものではなく生理心理状態の変動に関連する可能性がある。また、本研究では先行研究と異なり赤外光を生体に照射しておらず、顔面熱画像から得られる反射光の変動に関連する成分が少ないと予想できる。これらより、顔面熱画像に基づく血糖値推定の精度は低かったと考えられる。顔面近赤外画像において顔面全体に表出した空間特徴量は、顔面全体に走行する血管中のグルコース濃度の変動に関連すると考えられ、結果として、それらに基づく血糖値推定の精度が高くなったものと考えられる。顔面可視画像の元画像を観察したところ、特徴量が大きかった部位である目の下や顎の輪郭付近に照明に起因する陰影が生じていた。よって、表出した空間特徴量は血糖値に関連するものではなく、照明に起因する陰影に関連するものである可能性があり、結果として、それらの空間特徴量に基づく血糖値推定の精度は低くなったと考えられる。

以上より、可視・近赤外・赤外帯域のうちどの帯域が遠隔血糖値計測に適した波長域であるのか探索した結果、近赤外帯域が遠隔血糖値計測に適した波長域であることが示唆された。

## (2) 近赤外波長域における遠隔血糖値計測に適した波長域探索

全被験者の血糖値の参照血糖値、NIR-I および NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値の時系列を図2に示す。ただし、横軸はブドウ糖液服用からの経過時間、縦軸は血糖値であり、黒プロットは参照血糖値、青プロットは NIR-I で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値、赤プロットは NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値である。平均 RMSE を求めた結果、NIR-I で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値と参照血糖値の RMSE は 7.25mg/dL、NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値と参照血糖値の RMSE は 14.9mg/dL となり、NIR-I で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定精度が高かった。全被験者の中で重回帰分析における標準偏回帰係数が最大となった3名の被験者の NIR-I および NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量を図3に示す。結果、NIR-I で計測した顔画像より抽出した空間特徴量については顔面全体に特徴量が表出していたことに対し、NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量については眼窩部や鼻側部の特徴量が大きかった。

以上の結果に対する考察を行う。NIR-IIの方がNIR-Iと比べ光の深達度が高いことが知られているが、それぞれの波長域で計測した顔画像より抽出された空間特徴量の結果より、NIR-Iでは顔面全体の表皮近くを走行する毛細血管内の血中グルコース濃度変動に関する特徴を捉え、NIR-IIでは眼窩部や鼻側部周辺を走行する主要動脈中の血中グルコース濃度変動に関する特徴を捉えたと考えられる。一方で、波長が1400nm以上の光は水への吸収率が高まることも知られており、その波長域であるNIR-IIの近赤外光が生体内の水分に吸収され、その分、生体外で計測される散乱光量が減少することが予想できる。そのため、NIR-IIで計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定精度がNIR-Iのものとは比べ低くなったと考えられる。

以上より、遠隔血糖値計測に適した波長域はNIR-Iであることが示唆された。

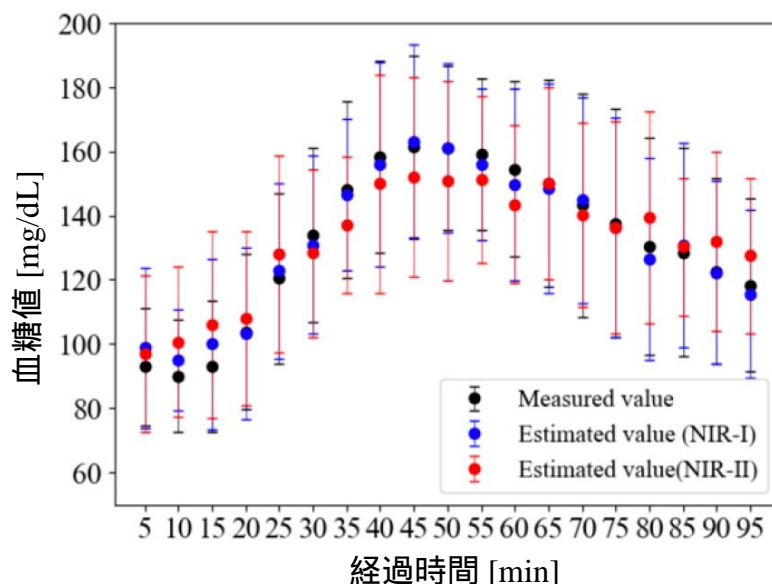


図2 全被験者の血糖値の参照血糖値、NIR-I および NIR-II で計測した顔画像より抽出した空間特徴量に基づく血糖値の推定値の時系列 (N=12, エラーバー：標準偏差)

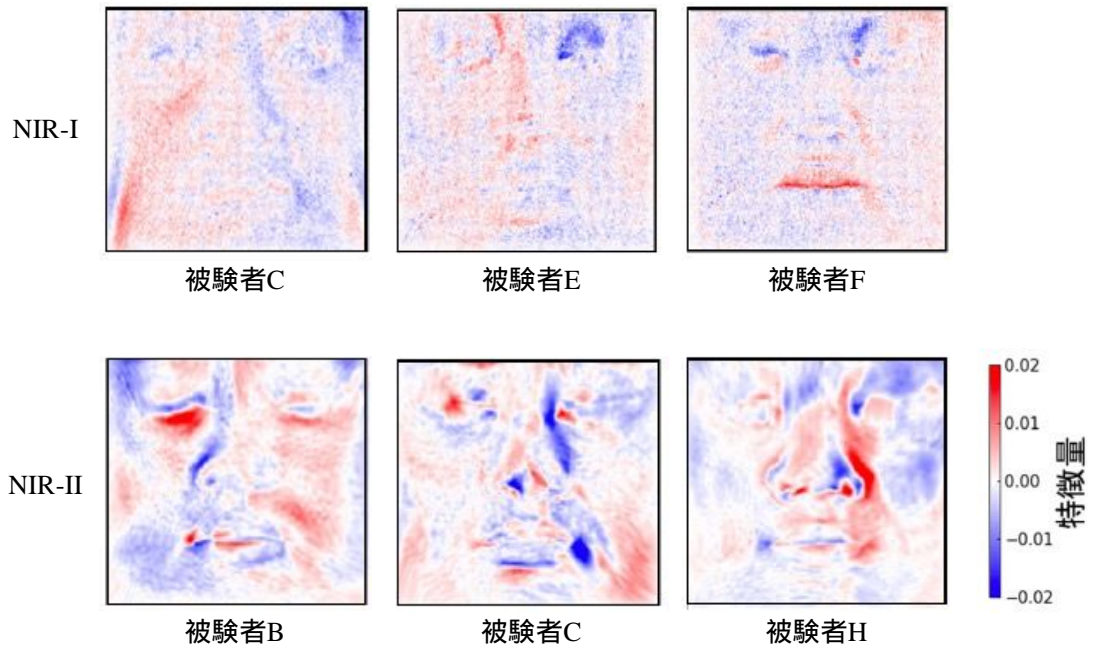


図3 標準偏回帰係数が最大となった3名の被験者のNIR-IおよびNIR-IIで計測した顔画像より抽出した空間特徴量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中川真結子, 南雲健人, 大岩孝輔, 野澤昭雄
2. 発表標題 多波長顔面画像を用いた遠隔血糖値センシング - 顔面熱画像を用いた血糖値に関する特徴抽出 -
3. 学会等名 第23回 日本感性工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川真結子, 南雲健人, 大岩孝輔, 野澤昭雄
2. 発表標題 可視・近赤外顔画像における血糖値に関する特徴抽出
3. 学会等名 情報処理学会 第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川真結子, 大岩孝輔, 野澤昭雄
2. 発表標題 近赤外顔画像を用いた血糖値計測における光源の広帯域化に関する検討
3. 学会等名 2022年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------