汎用一眼カメラを用いた血行動態変化の 可視化による熱中症予防技術への応用

Application to Heat Stroke Prevention Technology Based on Visualization of Hemodynamic Changes Using a General Single-Lens Camera

吉田 慧一郎

サレジオ工業高等専門学校電気工学科

〒194-0215

東京都町田市小山ヶ丘 4-6-8

Keiichiro YOSHIDA

Salesian Polytechnic Dept. of Electrical
Engineering

4-6-8 Oyamagaoka, Machida, Tokyo, 194-0215,
Japan

論文要旨:近年、熱中症の患者は増加傾向にあり、誰にでも起こりうる病気となっている。しかしながら、多くの人々は経験則に基づいた判断を行っていることにより、症状を未然に防ぐことが出来ていない。そのため、熱中症等の症状を未然に防ぐ技術が求められている。そこで我々は、汎用一眼カメラを近赤外線カメラに改造し、運動前後の皮膚表面を撮影し血行動態変化を可視化できないか検討を行った。本研究ではヒト皮膚表面から得られた赤外線画像を反射率画像に変換し、血行動態変化の可視化を試みた。実験は暗室内における前腕部の計測、暗室内における足裏部の計測、屋外における前腕部の計測の3種類を実施し、反射率の変化と血行動態変化の関連性を検討した。反射率画像の結果から、本提案計測システムが血行動態変化の可視化により熱中症等の予防に適用できる可能性が示された。

Abstract: In these days, the number of patients suffering from heat stroke is increasing. But, to determine heat stroke, most people tend to be empirical evidence. Therefore, we recognized the need for technology to prevent heat stroke before it happens. We have converted a single-lens camera into a near-infrared camera to measure the hemodynamic changes before and after exercise. In this study, we measured the IR images from human skin surface and calculated the reflectance images from IR images. And we performed three types of experiments, 1) Forearm measurement in the darkroom, 2) Sole measurement in the darkroom, 3) Outdoor forearm measurement. The results show that the relationship between reflectance images and hemodynamic changes, it was suggested that it could be used as a guide to prevent heat stroke.

Key words: hemodynamic, single-lens camera, NIR-Image Processing, heat stroke

1 緒言

現在、一般的な家電量販店や、インターネット通販等で市販されているデジタル一眼カメラの撮像素子であるCMOSセンサの性能向上は著しく、CMOSセンサ前面に設置されている赤外線カットフィルタを除去すること

により近赤外線下における撮影も可能となっている。これらの近赤外線撮影を行う為に改造されたデジタル一眼カメラを用いた一例として、文化財の調査^{1, 2)}や夜間の天体観測が挙げられる。天体観測では天体から発される近赤外光は肉眼でも見えず、通常のカメラでは撮影することが困難である。しかし、改造をしたカメラで撮影することで写真上では美しい赤色成分として映り、肉眼では見えない天体の姿を観測・撮影することができる。

連絡者：吉田 慧一郎
E-mail : k-yoshida@salesio-sp.ac.jp

また一方で、近年の温暖化の影響における熱中症の発生件数の増加も問題となってきた。これらの熱中症は日常生活の中でも起きる「非労作性熱中症」やスポーツや体を動かす等の活動を行っている際に起こる「労作性熱中症」があり、若年層から高齢層にかけて誰にでも起こりうる症状となっている^{3, 4)}。これらの症状は本人の自覚のないまま進行し、気が付かないうちに進行・悪化してしまう場合が多く、症状の悪化を未然に察知し、視覚的に対象者に示すことが可能なシステム構築が求められている。

そこで本研究では、近赤外線撮影を可能にした汎用一眼カメラを用いて、運動時におけるヒト前腕部ならびに足裏部における肉眼では捉えることが困難な血管領域を撮影し、運動前後における血行動態変化の可視化を行った。これらの結果をもとに、熱中症等の血行動態変化に起因する症状の未病を行うシステム構築を模索し、本提案システムの有用性を検討した。

2 近赤外線撮影システムの構築

2・1 汎用一眼レフカメラ使用の利点

本研究では、熱中症等の身近に発症しうる症状の未病を目標としている。そのため専門的な知識や機材を必要とせず、機材が取り扱い可能であり、かつ機材の調達およびシステム構築が簡便に行えることが好ましい。そこで、一般的に家電量販店やインターネット通販等で市販されているデジタル一眼カメラを用いて計測を行った。

以下に汎用一眼カメラを用いた計測を行う利点を示す。

①高画素・高画質であること

10~100万画素の画素数ならびに小型の撮像センサを用いている産業用・研究用の汎用 CCD/CMOS カメラと比較すると汎用一眼カメラは2,000万画素前後の画素数ならびに大きな撮像センサを搭載しており、産業用・研究用の汎用カメラと比較して解像度（空間分解能）が優れていると考えられる。

②操作が簡単であること

汎用一眼カメラは撮影の設定も使用者に合わせて豊富に用意されており、専門的な知識を必要とせず操作を行うことが可能である。また、詳細な取り扱い説明書が同封されていることに加え、各出版社が機種別のガイドブックを出版しているため、操作を覚えることが容易である。また、インターネット等でも操作方法は詳細に説明されており、若年層から高齢層にかけて操作を覚えやすい環境が整っている。

③オートフォーカス（AF）の性能が優秀である

近年の汎用一眼カメラの AF 性能は飛躍的に向上して

おり、被写体自動追尾機構や暗所における正確な合焦、瞳 AF など便利な機能が用意されている。また、これらの AF 機能のピントを合わせるまでの時間も大幅に短縮されており、動いている被写体に対して高精度にピントを合わせることも可能である。

④レンズ種類・拡張機能の豊富さ

市販されている交換用レンズの種類は幅広く、広い視野角で撮影可能な超広角・広角レンズ、一般的な標準レンズ、遠くの被写体を大きく写すことが可能な望遠・超望遠レンズなど用途に合わせた多種多様なレンズが市販されている。また、各レンズにはF値（絞り値）が異なるレンズもあり、撮影・計測環境や被写体の状況に合わせて臨機応変に対応することが可能である。これらの交換レンズは市中のカメラ専門店や家電量販店、インターネット通販等で幅広く取り扱われているため、入手が容易である。また、長時間撮影向けの大型バッテリーや暗所における撮影・計測に利用可能なストロボライト等の拡張機能、三脚等のアクセサリも豊富に用意されている。これら入手が容易であるため、計測システムの構築をスムーズに行うことが可能である。さらに、スマートフォンアプリでカメラ操作が可能となる機能の追加や Web カメラとして使用可能になるなど機能追加が継続的に行われているのも特徴である。

⑤優れた可搬性・耐衝撃性がある

汎用一眼カメラは内蔵バッテリーを電源として稼働し、内蔵 SD カードにデータを保存する。これは、屋外での計測において有益であり、症状が起こりやすいような場所で計測システム構築が可能となる。また、カメラ本体も衝撃に比較的強い構造をしており、カメラバック等の市販されているバックで持ち運びが可能である。

⑥ RAW 画像での画像データ取り扱いが容易である

汎用一眼カメラで撮影された計測データは RAW 形式で保存が可能である。この RAW 形式はカメラ上で圧縮処理を行わない情報量の多い生データであり、影の部分をも明るくする場合や、白く飛んでしまった部分を暗くする等の計測において必要としている情報を抽出することが可能である。これらの RAW 画像の編集はインターネット上で無償頒布されている専用ソフトウェアを用いることにより、編集作業を容易に行うことが可能となる。

2・2 計測システムの構築

近赤外線撮影は市販の一眼カメラに赤外線カットフィルタの除去改造を実施した EOS RP（Canon 製、撮像素子サイズ：35 mm フルサイズ 36.0 mm×24.0 mm）および EOS5D Mark III（Canon 製、撮像素子サイズ：35 mm フルサイズ 36.0 mm×24.0 mm）を用いた（Fig. 1）。また、近赤外線領域のみで撮影を行うために、使用レン

Fig. 1 Modified IR Single-lens Camera. (a) Canon EOS RP. (b) Canon EOS5D Mark III.

Fig. 2 The process of the modifying IR Single-lens Camera.

ズ (Canon 製, EF24-70 mm F2.8L II USM) 前面に波長 800 [nm] 以下の光を遮断する可視光線カットフィルタ (FUJIFILM 製, IR フィルター 80 号)⁵⁾ を取り付け、近赤外線領域での撮影を行った (Fig. 2)。撮影画像形式は CMOS センサから得られた無加工のセンサデータである RAW 形式とし、PC 上で 8bit の TIFF 形式に変換した。今回、取得された画像を定量的に取り扱うため、同条件で反射率 50% のグレーカード (銀一製, Ver.2 060012) を撮影し、同様に 8bit の TIFF 形式に変換後、グレーカードでの反射光強度を基準とした正規化を行い、運動前後での変化の様子を観察した (Fig. 3)。Fig. 4 に本計測システムでヒト右前腕部を撮影した結果を示す。可視光線下での肉眼では確認ができなかった血管部分とその他の部分の判別ができる。これらは、血管内に含まれるヘモグロビンは高い光吸収を有しており、そのため他の部位よりも反射光強度が低くなっていると考え

Fig. 3 Normalization process of IR imaging.

Fig. 4 Typical near infrared image of human forearm.

られる。

3 実験および結果

3・1 実験方法

本研究の実験について説明する。本研究では、以下の 3 通りの実験を実施した。なお、すべての実験は屋外および屋内で運動を実施する前後を赤外線カメラで撮影した。また、本提案法の比較検討を行うために運動の前後でパルスオキシメータ (パルスフィット BO-750, 日本精密測器株式会社製) を用いて動脈血酸素飽和度 (SpO_2)・心拍数 (HR) の計測を実施した。また、得られた反射率画像において ROI (30×30 pixels) をそれぞれ 2 か所ずつ設定し、反射率の変化を観察した。

(1) 暗室内右前腕部計測実験

光学暗室内で運動前後の右前腕部に先述した赤外光源を用いて近赤外撮影を実施した。撮影機材 (EOS 5D III) および赤外線光源 (秋月電子通商製, AE-LED56V2) は光学除振台上に設置された光学スタンドにて固定されている。また、撮影時は電灯を消灯ならびに光学暗室入り口を閉鎖し外乱光の影響をできる限り排除した状態で計測を実施した。Fig. 5 に計測時の様子を示す。右前腕部撮影時は光学スタンド上に腕を載せ、腕の振動を低減させている。また、撮影機材と右前腕部の距離は固定し、運動前後で変化を生じさせないようにしている。

Fig. 5 Experimental setup for IR imaging. Forearm measurement.

Fig. 6 Experimental setup for IR imaging. Sole measurement.

(2) 暗室内足裏部計測実験

Fig. 6 に本実験で用いた足裏部の計測システムを示す。本計測システムは靴を履いた状態が血行動態変化に与える影響を考慮した。撮影機材 (EOS RP) および赤外線光源 (秋月電子通商製, AE-LED56V2) は卓上光学除振台上に設置された光学スタンドにて固定されている。また、撮影時は右前腕部計測時と同様に電灯を消灯ならびに光学暗室入りを閉鎖し外乱光の影響をできる限り排除した状態で計測を実施した。

(3) 屋外右前腕部計測実験

屋外にて太陽光下で運動前後の右前腕部の近赤外撮影を実施した。本実験は汎用一眼カメラの高い可搬性を活かして、場所や環境を問わず計測が可能かどうかの確認を行うために実施した。撮影機材 (EOS RP) は撮影者が手で保持し、光源は太陽光としている (Fig. 7)。

3・2 暗室内右前腕部計測実験結果

暗室内右前腕部計測実験は夏期の晴天時に一般的なウォーキングコース (高低差約 30 [m]) で 60 分間の

Fig. 7 Experimental setup for IR imaging. Outdoor measurement.

Fig. 8 Near infrared image of walking experiment in the Mid-30s. (a) Before experiment. (b) After experiment.

Fig. 9 Near infrared image of tennis experiment in the Late-10s. (a) Before experiment. (b) After experiment.

歩行試験を実施した。Fig. 8 に 30 代半ば健康男性の実験時における結果の一例を、 600×600 pixels の範囲で抜き出した近赤外線画像に示す。可視光線下での肉眼では確認ができなかった血管部分とその他の部分の判別ができ、運動前 (HR : 77 [bpm], SpO_2 : 97 [%]) と運動後 (HR : 78 [bpm], SpO_2 : 96 [%]) を比較すると、HR および SpO_2 では運動における大きな変化は見られなかったが、血管部分において反射率の低下ならびに血管の太さが太くなっていることが目視で確認された。また、ROI におけるグレーカードを基準とした反射率は、

Fig. 10 Near infrared image of tennis experiment in the Late-10s. (a) Before experiment. (b) After experiment.

Fig. 11 Near infrared image of soccer experiment in the Early-20s. (a) Before experiment. (b) After experiment.

ROI 1 : 153 [%], ROI 2 : 161 [%], ROI 3 : 99 [%], ROI 4 : 137 [%] であった。運動において血流量の増大に伴う血管の拡張ならびに、ヘモグロビンの吸収増大により反射率の変化が生じているものと考えられる。

3・3 暗室内足裏部計測実験結果

暗室内右前腕部計測実験において、夏期の計測結果では血管部分の反射率減少が顕著に表れており、適度な運動による血流量の増大が考えられることに対して、冬期の計測結果では反射率が全体的に増加して結果が散見された(Fig. 9)。Fig. 9 では 10 代後半の健康男性において、運動前 (HR:111 [bpm], SpO₂:98 [%]) と運動後 (HR:136 [bpm], SpO₂:96 [%]) であり、ROI は ROI 5 : 83 [%], ROI 6 : 93 [%], ROI 7 : 95 [%], ROI 8 : 102[%] であった。これらの結果は冬期の低気温により、皮膚表面の温度が安定せず、血行動態変化を反映しきれていない可能性が考えられた。そこで、運動時の皮膚表面の周辺気温が靴および靴下で覆われて、冬期でも温度が安定している足裏部に着目して実験を行った。実験は 10 代後半の健康男性に対してバスケットボール (90 分) を実施した。Fig. 10 に実験結果を示す。運動前 (HR : 90 [bpm], SpO₂:98 [%]) と運動後 (HR:125 [bpm], SpO₂:96 [%]) を比較すると、HR において運動によっ

Fig. 12 Near infrared image of soccer experiment in the Mid-30s. (a) Before experiment. (b) After experiment.

Fig. 13 Change of reflectance between before-experiment and after-experiment. (a) Result for the Mid-30s. (b) Result for the Late-10s.

て大きく上昇していることが確認された。600×600 pixels の範囲で抜き出した近赤外線画像においては、足裏外側部にかけて温度が比較的安定している足裏部では運動後は運動前と比較すると血管領域の変化が確認された。ROI は ROI 9 : 128 [%], ROI 10 : 120 [%], ROI 11 : 136 [%], ROI 12 : 113 [%] であった。また、反射率も血管部分において減少しており、運動における血行動態変化が可視化されていることが分かる。

3・4 屋外右前腕部計測実験結果

実験は秋期に行われたサッカー競技で、2 名の被験者により実施した。Fig. 11 に 20 代前半健康男性における結果を示す。実験は合計 75 分間、サッカー競技を行ったものである。運動前 (HR:87 [bpm], SpO₂:97 [%]) と運動後 (HR : 164 [bpm], SpO₂:96 [%]) を比較すると、血管部分における反射率の減少と血管領域の増大が目視で確認された。ROI は ROI 13 : 107 [%], ROI 14:112 [%], ROI 15:105 [%], ROI 16:120 [%] であった。また、Fig. 12 に 30 代健康男性における結果を示す。合計 15 分間のサッカー競技を行った。運動前 (HR : 67 [bpm], SpO₂:98 [%]) と運動後 (HR : 128 [bpm], SpO₂:98 [%]) を比較すると、HR の増大は 20 代男性よりも低く、SpO₂ の低下も見られなかった。

ROIはROI 17: 93 [%], ROI 18: 90 [%], ROI 19: 109 [%], ROI 20: 107 [%]であった。しかしながら、本実験において、30代男性は体力の問題を感じたことによりサッカー競技を途中退場している。Fig. 12において、血管部分周辺における反射率の増大が確認され、明らかに75分間競技を行った20代男性の結果と異なっている。これらは、先述の体力の問題が関係していることが考えられ、HRやSpO₂では計測されなかった異常が、血行動態変化より計測が可能であることが示唆された。

4 考察および今後の課題

4・1 計測時期における問題

夏期における結果では、運動後に反射率の全体的な低下が確認された。また、血管部分の反射率減少が顕著に表れており、適度な運動による血流量の増大が考えられる。また、周辺気温の変化を最小限にした足裏部の結果では、運動後は運動前と比較すると血管領域の変化が確認された。また、反射率も血管部分において減少しており、運動における血行動態変化が可視化されていることが分かる。これらより、冬期において血行動態変化を安定的に可視化するためには靴で覆われている足裏部など温度変化が小さい部分に焦点を当てる必要があることが判明した。しかしながら、足裏部の計測では腕部に比べると皸の影響を受けやすいため、足裏部の計測では何らかの皸対策を施す必要がある。また、夏期では冬期ほど気温差などによる温度差は生じないため、右前腕部での計測手法は有用であると考えられる。

4・2 今後の課題

本研究は汎用一眼カメラを用い、運動前後における血行動態変化を可視化している。そのため、運動前後の被写体の位置を一致させ、変化率を定量的に算出することが好ましい。Fig. 13に運動前後における計測箇所が一致した例を示す。Fig. 13 (a)はFig. 8の変化率を示したものであり、Fig. 13 (b)はFig. 8と同条件で計測した10代後半健康男性の結果である。結果は運動前の反射率を基準とした運動後の反射率の変化率であり、それぞれのROIにおける変化率は、ROI 21: -10.3 [%], ROI 22: -13.1 [%], ROI 23: -3.2 [%], ROI 24: -6.6 [%], ROI 25: -8.1 [%], ROI 26: -4.0 [%]であった。これらは、運動において血流量の増大に伴う血管の拡張ならびに、ヘモグロビンの吸収増大により反射率の変化が生じているものと考えられる。この様に、計測箇所が一致した際には運動前後での変化の詳細を求めることが可能である。また、現状の計測システムではリファレンスとしているグレーカードと腕の位置にもズレが生じるため、光源に対して腕の位置とグレーカード

Fig. 14 The foot type reference.

の位置を完全に一致させることが必要である。そこで、今後の予定として、靴を履いた状態を考慮し、足裏部ならびに新たに足側面部での計測を行い、グレーカードに替わるリファレンスとして実物大の足型模型を作製し(Fig. 14)、運動前後の比較を行っていく。

5 結言

本研究は熱中症等の予防技術の確立を目的とし、汎用一眼カメラを用いた運動時におけるヒト右前腕部および足裏部において近赤外線撮影を実施、運動前後での血行動態変化の可視化を行った。運動において運動前と運動後を比較すると血行動態の大きな変化が確認された。

その結果、取得した画像から表皮下の血管部および、他皮膚組織の区別が可能であることから、血管部分の面積拡張や反射率の変化による血行動態変化の観測が可能であることが考えられる。また、これらの変化と血流量の増減に関係があると仮定した場合、夏期における運動では、右前腕部において血流量が増大していることが確認できた。それに対して、冬期における運動では、周囲の気温が影響して夏期のような変化を捉えることが困難であった。これらの結果より、周辺気温の影響を抑えるべく足裏部で計測を行ったところ、前腕部で変化がない周囲環境においても血行動態の変化を確認することが出来た。

また一方で、汎用一眼カメラを用いることで、マクロレンズを用いた近距離計測から望遠レンズを用いた10[m]~15[m]などの中距離における計測など、想定する計測現場に合わせたレンズ使用が可能となる為、場所を限定することなく必要とされる状況での計測が可能となる。

以上より、本提案手法である汎用一眼カメラを用いた運動前後における血行動態変化の可視化ならびに熱中症

等の予防に関して有効な検討が可能であると考えられる。

謝辞

本研究において、計測システムの構想から構築ならびに運用に関して尽力頂いた菅野峻矢氏、実験協力して頂いた住吉佑基氏に心より感謝致します。

文献

- 1) 大下浩司, 下山進, 汎用デジタル一眼レフカメラを用いた赤外線写真撮影法, 文化財情報学研究第11号, 1-8 (2014). (Oshita, K. *et al.* *Bunkazai Jouhougaku Kenkyuu* 11, 1-8 (2014))
- 2) 野村正弘, 改造したコンシューマ向けデジタルカメラを用いた墨書の赤外線撮影, メディアと情報資源 第23巻1号, 9-2 (2016). (Nomura, M. *Media and Information Resources* 23, 9-16 (2016))
- 3) 環境省熱中症予防情報サイト, 令和2年の全国の暑さ指数(WBGT)の観測状況及び熱中症による救急搬送者数と暑さ指数との関係について(令和2年度最終報), https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/R02_heatillness_report_23.pdf (参照 2021.7.10) (Ministry of the Environment Government of Japan, Heat Illness Prevention Information)
- 4) 総務省消防庁熱中症情報緊急搬送状況, 令和3年度の情報, <https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html> (参照 2021.7.10) (Fire and Disaster Management Agency)
- 5) FUJIFILM 富士フイルム光学フィルター FUJIFILM OPTICAL TRI ACETYL CELLULOSE, https://asset.fujifilm.com/www/jp/files/2019-12/10825b6d1310354377e8edc803f309f2/films_sheetfilter_handbook_01.pdf (参照 2021.7.10)