

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350700

研究課題名(和文) マウナケア山頂における作業者の健康管理のための小型高機能行動記録装置の開発

研究課題名(英文) Development of a Multifunctional Pocket-sized Activity Monitor for Maunakea Summit Workers

研究代表者

瀧浦 晃基 (TAKIURA, KOKI)

国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員

研究者番号：60375194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：マウナケア山頂作業者の身体活動情報に加え、生体情報、さらに作業環境情報を同時記録する小型高機能行動記録装置を開発することを目的とした。身体活動情報は加速度計・ジャイロ・GPSから得た情報を、生体情報は動脈血酸素飽和度・心拍数を、作業環境情報は気温・湿度・気圧を同時記録する装置を開発し、作業用ヘルメットに固定する形態とした。開発した装置を取り付けたヘルメットを装着し、マウナケア山頂において、全情報の同時記録実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a multifunctional pocket-sized activity monitor was developed for Maunakea summit workers. This monitor records activity (acceleration, angular rate and position), vital (blood oxygen saturation and heart rate) and environmental information (temperature, humidity and barometric pressure). Recording experiments were conducted with this device fixed to a hard hat during Maunakea summit work.

研究分野：機械工学，生体工学

キーワード：行動記録 身体活動度 生体情報 環境情報 高山病

1. 研究開始当初の背景

高山病は、標高が上がる際に大気中の酸素分圧が減少することが原因で発症するとされ、その初期症状は頭痛・睡眠障害・疲労感・めまい・吐き気などである。重篤化した場合は、脳浮腫や肺水腫を発症し、致命的な結果にいたることもある。高山病については、これまでに、多くの研究発表があるにもかかわらず、その分子・細胞レベルの発症メカニズムは、いまだ不明な点が多い。マウナケア山頂作業における急性高山病発生の割合は約70%と非常に高率で(J Onopa, "Survey of Acute Mountain Sickness on Mauna Kea", High Altitude Medicine and Biology, Vol.8, pp.200-205, 2007),多くの作業員が高山病の症状を抱えながら業務についている。すばる望遠鏡では数年おきに、直径8メートルの主鏡の再蒸着作業が実施され、二ヶ月間にわたり、のべ1000人以上の作業員が高地作業に従事する。これら作業員の多くは、通常低地に居住し、特別な高地作業用の訓練を受けることなく作業に加わる。従って、高山病症状の早期発見や高地順応について検討することは、作業員の健康や安全を確保する上で非常に重要な課題である。マウナケア山頂という、日本国内において得ることが困難な低酸素の環境下で、肉体労働や精神労働を日常的に行う際に身体に起こる変化を捉え、作業員の健康管理に資する高機能行動記録装置の開発が期待されている。また、十分に小型で軽量な高機能行動記録装置が実現できれば、すばる望遠鏡のような高地作業時の健康管理や労働環境評価が可能になるだけでなく、低酸素環境以外の労働環境の評価にも応用可能であり、健康・福祉や産業衛生といった研究分野に大いに貢献できるものと期待できる。

2. 研究の目的

すばる望遠鏡は、標高4200mのハワイ島マウナケア山頂に設置された、我が国が所有する大型光学赤外線望遠鏡である。マウナケア山頂作業員の急性高山病の発生率は約70%と報告され、多くの作業員は、何らかの高山病症状を抱えながら業務をこなしている。これら作業員の健康管理や高山病を誘発する環境への身体の順応について議論するためには、作業時の身体活動情報や作業環境情報等を取得する必要がある。本研究では、3軸加速度計・3軸ジャイロ(角速度計)・GPS(全地球測位システム)による被験者の身体活動情報に加えて、生体情報(動脈血酸素飽和度・心拍数)、さらに作業環境情報(気温・湿度・気圧)を同時に記録する小型高機能行動記録装置を開発することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究で開発する高機能行動記録装置は、大きく分類して三種類の情報を外部メディアに記録する。身体活動情報の記録機能はMEMS技術を利用した加速度計と角速度計からなり、

間欠的に取得されるGPSの情報に合わせて用いることによって位置測定精度を向上させることができる。生体情報は、パルスオキシメーターから、動脈血酸素飽和度と脈拍数を取得する。さらに作業環境情報として、外気温・湿度・大気圧を記録することができる。また、作業員の業務遂行を妨げることをしないよう、十分な小型軽量化を目標とした。この目標を実現するために、全工程を次の4つのステップに分割し、研究開発を推進した。

(1) 各種情報の測定手段の調査と測定用電子回路の最適化

小型化と省電力化を目指し、また電子デバイスの入手が容易となるよう、低電圧(3.3V)駆動の集積回路を中心に、測定手段の調査を実施した。また、集積回路間の通信仕様については、高速なSPI(Serial Peripheral Interface)通信を採用した。採用候補となった集積回路センサーについては、ワンチップマイコンを用いた、デバイス試験用電子回路を作成し、そのセンサーが本研究の目的を満足するかどうかを評価すると同時に、測定用電子回路の最適化も実施した。

(2) 身体活動情報と作業環境情報を同時記録する装置の開発

開発する行動記録装置で扱う三種類の情報のうち、身体活動情報と作業環境情報については、生体情報の取得機能の開発よりも、先行して作業が進むことが予想された。これは、生体情報の取得については、電子基板上に組む演算回路のほかに、人体とのインターフェースも開発する必要があり、より開発時間が必要と予想されたためである。そこで、身体活動情報と作業環境情報の記録機能については、採用する集積回路センサーが決定し、測定用電子回路の設計に目途がついた段階で、これら二つの情報の記録機能を統合した試作装置を作成し、小型軽量化を目指した改良を加えていくこととした。

(3) 生体情報の記録装置の開発

生体情報については、非侵襲的に光センサーを利用して情報が取得できる、動脈血酸素飽和度と脈拍数を測定することとした。また、パルスオキシメーターの原理で得られる吸光度の脈波を解析することで、呼吸数が得られるとの研究報告もあるため、本研究で取得すべき生体情報は、パルスオキシメーターによってのみ得ることとした。ただし、呼吸数の推定機能は、将来的な目標とした。パルスオキシメーターの開発については、文献("P O Box - Utilizing a Microchip dsPic30F2012 digital signal controller, Product: Pulse Oximeter", 2007)を参考にし、より非力なワンチップマイコンでも演算が間に合うよう、軽量なアルゴリズムを開発することとした。またパルスオキシメーターは、指先に装着するプローブで測定する機会が多い測定

手段であるが、指先センサー・プローブの装着は、マウナケア山頂の作業に支障が生じるため、前額部で測定するセンサー・プローブの開発を目指した。このように、人体とのインターフェースを開発する必要があるため、生体情報の記録機能については、他の情報取得機能よりも、開発時間が長期化すると予想された。そこで、生体情報の取得機能は、まず単機能の装置として開発することとした。

(4) 身体活動情報・作業環境情報・生体情報を同時記録する統合基板の開発

身体活動情報、作業環境情報、さらに生体情報、それぞれの取得記録機能の開発に目途がついた段階で、これら全機能を単一の基板に統合していった。また、このステップにおいては、単一基板に統合した行動記録装置を、機能的に動作させるための組み込みソフトウェアの開発が重要であった。さらに、行動記録装置の身体への装着については、山頂作業の妨げにならないよう、十分な小型軽量化を実現すべく、研究開発を進めた。全記録機能が使用できる装置が開発されたのち、マウナケア山頂において、身体活動情報・作業環境情報・生体情報の同時記録実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 各種情報の測定手段の調査結果

身体活動情報として、加速度と角速度を測定することとした。この目的のために、Invensense 社製 MPU-6000 を採用した。この集積回路は、一つのパッケージ内に 3 軸加速度計と 3 軸角速度計を備えており、設置面積が節約できる。さらに、集積回路実装時に加速度軸と角速度軸のズレが発生しないという特徴がある。出力形式はデジタルである。1024 バイトの FIFO バッファを装備し、メインプロセッサの負荷を減らすことができる。加速度の測定範囲は $\pm 4g$ 、角速度の測定範囲は ± 500 度/秒、さらにサンプリング周波数を 128Hz とした。また、被測定者の位置情報を得るために、GPS 受信機には ftech 社製 FMP06-TLP を採用した。この受信機は、パッチアンテナを含んだ寸法が、 $16 \times 16 \times 6.7$ mm と小型であるものの、トラッキング時の感度が -165 dBm と非常に高感度である。また、取得情報の 10Hz 出力と、115200bps という高速通信速度が特徴である。

作業環境情報として、気圧・温度・湿度を測定することとした。気圧の測定のために、ST マイクロ社製 LPS25H を採用した。絶対圧センサーであるが、温度データの出力も可能である。気圧については、高精度モードでは約 10cm の高低差が測定可能な仕様である。出力形式はデジタルである。湿度測定のための集積回路は、Honeywell 社製 HIH6131 とした。温度を同時測定できる湿度センサーである。湿度センサーは、SPI 通信を使用できるものが数少なかった。湿度データを得るための後処理が少なく、メインプロセッサへの

負荷が少なく済む点、また、長期安定性や高信頼性を仕様でうたっていることから、本センサーを採用した。出力形式はデジタルである。リアルタイムクロック（時計回路）として、ST マイクロ社製 M41T93 を採用した。この集積回路は、パッケージ内に水晶発振子を内蔵しており、 ± 5 ppm と高精度である。本集積回路から 32.768kHz のパルスを出力させ、MPU-6000 やメインプロセッサのタイミング回路の基準波として使用した。これにより、複数のプロセッサの動作タイミングを一致させることができた。また、この時計回路は、0.01 秒までの時刻出力機能を持っている。この時刻出力機能が、本研究における開発途中、プロセッサの動作タイミング等を確認するために非常に役立った。

電源関連の部品・集積回路としては、まず電池は容量 850mAh のリチウム・ポリマー電池を採用した。電圧コンバータは、Texas Instruments 社製 TPS63001 とした。この電源用集積回路は、1 セルのリチウム・ポリマー電池を電源とする装置に適した電圧コンバータである。リチウム・ポリマー電池の充電制御には、Maxim 社製 MAX1555 を使用した。

測定データの記録には、オープン・ソースの小型ロガーである OpenLog を使用した。マウナケア山頂では、電波の使用が禁止されているため、行動記録装置内でデータを保存しなければならない。この記録装置は、マイクロ SD カードを記憶媒体としているため、設置面積が少なく済む。また、シリアル通信によってデータを受け渡すだけで、そのデータを記録するため、メインプロセッサの組み込みソフトウェアを、容易に開発することが可能であった。

各種測定・記録機能を制御するプロセッサについては、パルスオキシメーターの回路には、Microchip 社製 PIC18F26K22 を使用した。また、行動記録装置全体を制御するメインプロセッサとして、Microchip 社製 PIC18F46K22 を使用した。さらに、内部情報等を表示させるために、ミニ I2C 液晶モジュール (Strawberry Linux 社製、SB0802GN) を用いた。

(2) 身体活動情報と作業環境情報の同時記録装置

身体活動情報と作業環境情報については、採用する集積回路センサーが決定し、測定用電子回路の設計に目途がついた段階で、これら二つの情報記録機能を統合した試作装置を作成し、小型軽量化を目指した改良を加えていった。この基板には、GPS 受信機能、加速度・角速度測定機能、時計機能、温度・湿度・気圧測定機能、マイクロ SD カードへの記録機能、液晶表示器やブザーなどを設置し、リチウム・ポリマー電池を電源とし、その充電機能も装備させた。ブレッドボード上で組んだ動作確認用回路を経て、開発当初は 100×100 mm であった基板サイズが、最終段階

では 60x50mm と、基板面積で 70%減という小型化が実現できた。質量についても、電池を含んだ質量で、開発当初の 53g から、最終段階で 35g へと、30%以上の軽量化に成功した。

(3) 生体情報の記録装置

生体情報については、非侵襲的に光センサーを利用して情報が取得できる、動脈血酸素飽和度と脈拍数を測定することとした。指先装着型プローブで測定する機会が多いパルスオキシメーターであるが、指先プローブの装着は、マウナケア山頂の作業に支障があるため、前額部位置に装着するセンサー・プローブを開発した。本機能については、身体活動情報や作業環境情報の測定記録機能とは別に、単機能の装置として開発を進めた。ブレッドボード上に組んだ試作回路によって、基本動作を確認した後、まず 50x50mm サイズの二層基板で回路を組み上げた。さらに、他の測定機能と統合する際に、更なる小型化が必要であったため、40x40mm サイズの四層基板とした。この基板の研究開発によって、四層基板の設計製作による電子回路の稠密化について、実現の目途をつけることができた。

(4) 身体活動情報・作業環境情報・生体情報を同時記録できる装置の開発とマウナケア山頂における記録実験

身体活動情報と作業環境情報の記録機能を統合した装置、および生体情報の取得記録装置を開発した後、これら三種類の情報測定記録機能を、単一の基板に統合した。四層基板を採用し、演算回路を稠密化した結果、最終的な基板サイズは 60x50mm と、前述した二機能の統合基板と同サイズとすることができた(図1)。電池やパルスオキシメーターのセンサー・プローブを含んだ質量は 51g であり、十分な小型軽量化が実現できた。全機能を取得するための電子基板を作成した後、これを行動記録装置として、機能的に動作させるための組み込みソフトウェアの開発を実施した。



図1 全機能の統合基板

開発した行動記録装置の身体への装着については、山頂作業の妨げにならないよう、作業用ヘルメットに固定する形式とした。作業用ヘルメット(PETZL社製、ALVEO BEST)には、その後部に、アクセサリを装着するためのスロットが、あらかじめ開けられている。このスロットを利用して、本研究で開発した行動記録装置をヘルメットに固定することにした。光造形法三次元プリンターを用いた加工により、ヘルメットのアクセサリ固定用スロットにはまる爪と電子基板を収納する筐体を一体で成形した。また、パルスオキシメーターのセンサー・プローブは、ヘルメットの前額部緩衝材に埋め込んだ。最終的には、筐体も含めた行動記録装置のサイズは、寸法 67x64x36mm(ヘルメット固定用の爪部分を含む)、質量は 111g となった。装置の質量は、単三型のニッケル水素電池 4 本分とほぼ同じで、ヘルメットに装着するヘッドライトとサイズ・質量ともに同等であり、作業の妨げにならないよう、十分な小型軽量化が実現できた。

開発した小型高機能行動記録装置を取り付けたヘルメットを装着し、マウナケア山頂において、身体活動情報・作業環境情報・生体情報の同時記録実験を実施した(図2)。



図2 マウナケア山頂における記録実験(ヘルメット後部に、本研究で開発した小型高機能行動記録装置が装着されている)

この測定記録実験によって、開発した小型高機能行動記録装置のハードウェアとソフトウェアの動作を確認した。身体活動情報と作業環境情報については、当初の目標通りの性能が実現できた。生体情報(パルスオキシメーターによる動脈血酸素飽和度)については測定結果が不安定になることが経験された。これは、体動によって、センサー・プローブに前額部との間でズレが生じた結果と考えられた。この生体情報取得の不安定さに対しては、今後、センサー・プローブ形状とその固定方法や、動脈血酸素飽和度の測定アルゴリズムの改善などで、より安定的に測定が行えるよう改良を進める予定である。

(5) まとめ

マウナケア山頂作業者の身体活動情報に加え、生体情報、さらに作業環境情報を同時に記録する小型高機能行動記録装置を開発した。身体活動情報は加速度計・ジャイロ・GPS から得た情報を、生体情報は動脈血酸素飽和度・心拍数を、作業環境情報は気温・湿度・気圧を、同時に記録する装置を開発し、作業用ヘルメットに固定する形態とした。開発した装置を取り付けたヘルメットを装着し、マウナケア山頂において、全情報の同時記録実験を実施した。生体情報の取得機能の不安定さについては、引き続き、その改良を進めていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

菅井清美, 瀧浦晃基, マウナケア山頂作業者の着衣環境, 日本繊維製品消費科学会 2015年度年次大会, 2015年6月27日, 信州大学繊維学部(長野県上田市)

菅井清美, 瀧浦晃基, 寒冷・高地での着衣環境の検討, 日本人間工学会 第56回大会, 2015年6月13日, 芝浦工業大学芝浦キャンパス(東京都港区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧浦 晃基 (TAKIURA KOKI)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員
研究者番号: 60375194

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

中村 真人 (NAKAMURA MAKOTO)
富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授
研究者番号: 90301803

菅井 清美 (SUGAI KIYOMI)
新潟県立大学・国際地域学部・教授
研究者番号: 60150299

(4) 研究協力者

坂上 博隆 (SAKAUE HIROTAKA)
University of Notre Dame・College of Engineering・Associate Professor