

身体負担の可視化と管理と軽労化

田中孝之^{†1} 日下 聖^{†1} 土谷圭央^{†1} 宮島沙織^{†1}

概要: 本報告では、我々が開発した作業中の身体負担を可視化し、管理するためのウェアラブルセンサシステムを紹介する。いずれのデバイスも複数、複数種のセンサによって構成され、筋骨格動力学モデルによって身体負担を算出するシステムである。身体負担を可視化し、管理することは、作業全体の総合的な改善につながり、本報告で紹介するウェアラブルセンサシステムは、高齢者などの身体弱者が安全に労働する上で、重要な技術となる。システムの概要および実証試験の結果について紹介する。

キーワード: ウェアラブルセンサ, デジタルヒューマン, 軽労化, アシスト技術

Visualization and Management of Work Load for *KEIROKA* assist

TAKAYUKI TANAKA^{†1} TAKASHI KUSAKA^{†2}
YOSHIO TSUCHIYA^{†1} SAORI MIYAJIMA^{†3}

Abstract: We developed two kinds of wearable sensor systems to log and manage worker's load for improvement of their safety. These systems consist of multiple inertial sensors, vending sensors and muscle-skeletal dynamics model. This paper describes an outline of wearable sensor system and estimation system of *KEIROKA* assistive effect, and then show an experimental result of logging and analysis of worker's load in a real field.

Keywords: Wearable sensor, digital human, *KEIROKA* assist, assistive technology

1. はじめに

少子高齢社会を迎え、労働人口を支えるために、高齢者労働の必要性が議論されている。高齢者労働を支える技術の1つとして、各種作業の軽労化、つまり作業負担を軽減するための様々なアシストツールの実用化が進んでいる。中腰姿勢での腰部負担軽減を目的としたものだけでも、我々が開発したスマートスーツ[1] ほか、作業用 HAL, マッスルスーツ, Awn-03 など、既に事業化、市販化されているアシストツールも少なくない。そのため、ユーザ側からすると、どのアシストツールが自身の作業に適しているのか、またどの程度自身の作業負担が軽減されるのかを、実作業で使用してみなければ判断できないという問題があった。アシストツールを現場へ適用するためには、それらの補助効果を検証するとともに、作業者の作業内容、プロセス、環境を分析した上で、人間工学的な観点から総合的な作業改善を計画する必要がある。

従来、作業分析には主にビデオ撮影に基づく方法が取られていたが、全ての作業者、作業内容を網羅することは困難であった。Miura [2], Imamura [3] らは、ヒューマノイドロボットを用いて再現性高く作業動作に対するアシストツールの補助効果を定量的に評価する手法を構築しているが、すべての作業動作に対する評価を実現するには至っていない。さらに、作業者は自身に、いつ、どのように負担

がかかったかを意識しながら作業することは稀であり、管理者も実際の作業負担とそれに伴う疾病原因の追究を行うことは困難である。そのため、作業環境の改善を行うにも、十分な情報が得られていない。

我々は、作業者の身体負担を計測し、管理する2つのウェアラブルセンサシステムの開発を行ってきた。一方は、全身に取り付けた複数の慣性センサを用いて動作を計測し、全身筋骨格動力学モデルを用いて各部身体負担を計算するシステムである。もう一方は、腰部に取り付けた複数種のセンサで腰仙椎アライメント形状を推定し、腰部筋骨格動力学モデルから腰部負担を計算するシステムである。それぞれ、作業負担を可視化して認知アシストを、および作業負担を管理して作業軽労化のための情報収集を目的としている。本報告では、これらのセンサシステムについて紹介する。

2. 複数慣性センサを用いた動作計測とアシストツールの軽労化効果見積もり

2.1 複数慣性センサを用いたウェアラブルモーションキャプチャ

スマートスーツは腰および股関節に対して補助力を加える装着型アシスト器具である。それら部位の関節トルクを求めるために必要な動作計測を行うため、図1のように、下腿、大腿、胴体の3か所に6軸加速度・角速度センサ(慣

^{†1} 北海道大学
Hokkaido University

性センサ)を取り付けた。これにより、同図の3リンクモデルとして、以下の手順で動作計測を行う[4]。

まず、直立姿勢および前屈姿勢を計測することで、センサ座標系とリンク座標系との座標変換行列のキャリブレーションを行う。つぎに、相補フィルタを改良した変動相補フィルタによって各センサの加速度、角速度情報からそれぞれのオイラー角を求め、先に同定した座標変換行列を用いて各リンク姿勢を求め、関節角度 θ_s をリンク間角度として算出する。その時系列データを動作 $\mathbf{M}_s$ とする。

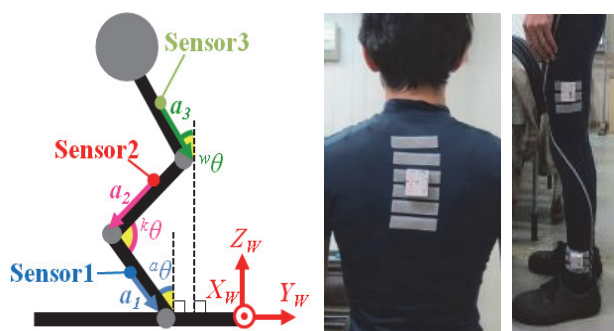


図1 慣性センサの配置と3リンクモデル
Figure 1. Location of sensors and 3 link model for simplified motion measurement

2.2 筋骨格力学モデルを用いた身体負担の算出

3リンクモデルで算出した動作データ $\mathbf{M}_s$ を筋骨格力学モデルで扱える動作データ $\mathbf{M}_M$ とするため、動作変換を行う。本システムでは筋骨格力学モデルSIMMを用いて、関節トルクおよび筋発揮力を計算する。その骨格モデルは3リンクモデルと比べて高次元であり、動作変換のための写像は実験的に求めた。つぎに、SIMMに動作データ $\mathbf{M}_M$ を入力して、作業中の身体負担、つまり関節トルク τ_H を算出する。

矢状平面での腰膝屈伸動作において、光学式モーションキャプチャを用いて計測した動作データを真値としてSIMMで算出した腰関節トルクと本提案手法での算出結果を比較すると平均誤差は5.3%であり、精度良く作業負担を計算できることが確認された。

2.3 アシストツールの軽労化効果の見積もり

軽労化支援スーツ「スマートスーツ」は、筋骨格力学モデルを用いて補助力源である弾性材の特性と配置を最適化している[1]。それと同じ過程で、軽労化効果、つまり身体負担の軽減効果を算出することができる。この評価方法は人間およびヒューマノイドロボットによる効果検証実験により、その妥当性を検証している[3]。

図2のようにSIMM上に表現したスマートスーツモデルによって、作業中にスマートスーツが各関節に作用する力を算出することができる。前述と同様に、動作データ $\mathbf{M}_M$ をスマートスーツモデルに入力し、各関節に及ぼすトルク τ_s を算出する。

最後に、スマートスーツによる作業の軽労化効果を算出する。SIMMで求めた作業者の関節 i の関節トルクを τ_{Hi} 、スマート

スーツが及ぼすトルクを τ_{Si} とすると、軽労化効果 α_i は次のように求まる。

- (1) τ_{Si} と τ_{Hi} が同符号で $|\tau_{Si}| \leq |\tau_{Hi}|$ の場合(補助)

$$\alpha_i = \tau_{Si} / \tau_{Hi} \quad (1)$$

- (2) τ_{Si} と τ_{Hi} が同符号で $|\tau_{Si}| > |\tau_{Hi}|$ の場合(負担)

$$\alpha_i = (\tau_{Hi} - \tau_{Si}) / \tau_{Hi} \quad (2)$$

- (3) τ_{Si} と τ_{Hi} が異符号の場合(負担)

$$\alpha_i = \tau_{Si} / \tau_{Hi} \quad (3)$$

軽労化効果は必ずしも正、つまり負担軽減となるとは限らず、負となる場合もあり、その場合にはスマートスーツが作業者の動作を妨げることになる。例えば、歩行の妨げなどである。

図3はミサワホーム北海道工場(石狩市)における実証実験の解析結果の一例である。本システムでは、作業姿勢および関節への負担をグラフ表示、およびデジタルヒューマンモデルを用いた表示をすることができる。普段の作業を妨げることなく、長時間の作業姿勢の記録に成功した。これによって、作業員、管理者ともに、身体負担を客観的に把握することができ、作業姿勢や作業環境の改善手段を検討することができた。更には、スマートスーツ導入による作業軽労化の効果、つまり腰関節負担の軽減効果を導入前に見積もることができた。

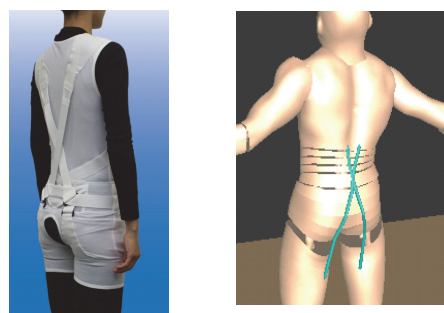


図2 スマートスーツと筋骨格力学モデル
Figure 2. Model of Smart Suit on musculo-skeletal dynamics model

3. 複数種センサを用いた腰部負担センサ内蔵ウェア

3.1 腰部負担センサ内蔵ウェア

装着型の腰部負担センサを開発した。その特徴として、土谷らの腰仙椎アライメント推定アルゴリズム[5]により、内蔵したセンサ群により装着者の背面形状を計測するだけで、非侵襲的に人体内部の骨格情報を推定することを可能としている。さらに、身長と体重を入力することで内部パラメータの校正を行う手法により個人毎のフィッティングを行っている[6]。

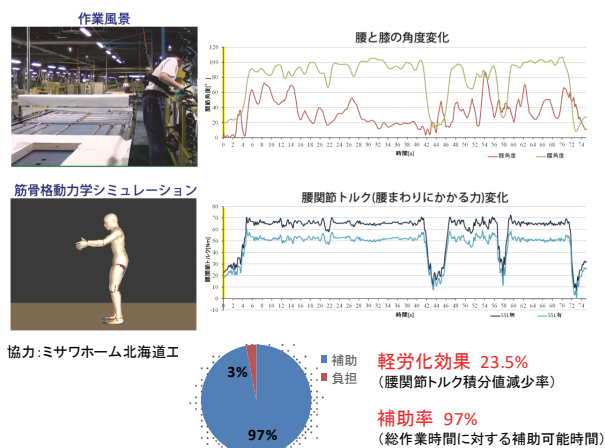


図3 作業負担・軽労化効果実証実験の解析例
Figure 3. An example of demonstration experiment of logging of work load and estimation of KEIROKA assistive effect.

具体的には図4のように、腰仙椎アライメント推定では背面に配置した曲率センサにより、表皮の形状を計測する。その表皮形状と事前にレントゲン画像を取得した腰椎形状の対応関係から腰仙椎アライメントとを推定する。主として薄い曲率センサを用いているため、衣服の中に埋め込むことが可能であり、作業着の中に下着のように着用可能であるため、使用に関して特別な拘束を受けることなく、現場ですぐに使用可能である。

また、推定した腰仙椎アライメントより腰部にかかる力学的な負荷の計算を行っている。それらの妥当性としては、先行研究の Nachemson [7] や、瀬尾 [8] の腰部負荷計測結果と一致することを確認している [9]。

3.2 介護施設における作業負担記録実証試験

開発したセンサシステムの検証のため、フィールド試験を行った。介護老人保健施設なごみのさと(秋田県大曲市)において、介護職員3名(男性2名、女性1名)にウェアラブル腰部負荷センサを着用してもらい、実際の介護作業を1時間連続で計測した。計測終了後に着用した職員と施設管理者に対して、視覚化した計測結果である図5の画面を閲覧しながらアンケートとインタビューを行った。

ヒアリングの結果として、実際に着用した介護従事者からは、

- ・ 装置のサイズは気にならず、全体的に装着の違和感はない
- ・ 負荷が定量的に示されて危険姿勢が分かるので、作業改善の気づきとなった
- ・ 姿勢とその負荷がオンラインで表示可能なので、介護作業姿勢の教育に有用
- ・ などのコメントが得られた。耐久性などの懸念点の他は全体的に良好であるとの意見であり、試験中にすでに作業改善の気づきとして役に立ったとの意見をいただいた。また、施設管理者にも着用してもらった結果、

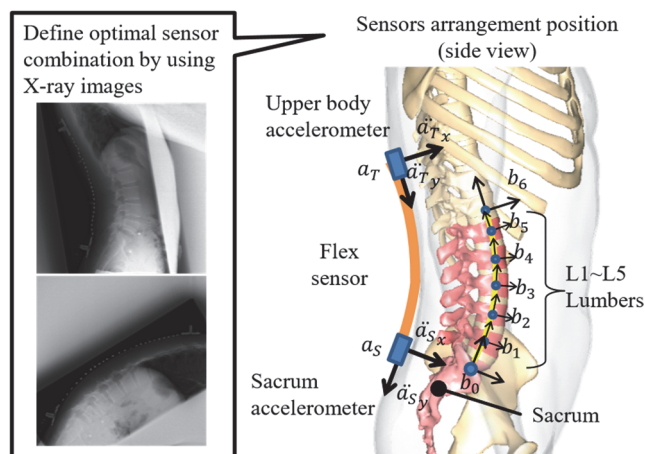


図4 腰部負担センサ内蔵ウェアと腰部アライメント推定
Figure 4 Lumbo-sacral alignment estimation by using wearable sensors

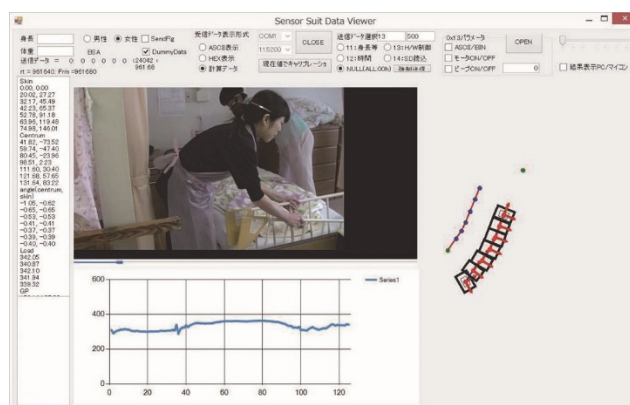


図5 介護施設における実証試験
Figure 5 Field test on a nurse care house

- ・ 介護従事者の作業量の適切な平常化に有用
- ・ これまで難しかった作業者の「頑張り」をきちんと見てあげることが可能
- ・ 多くの作業者の状況を俯瞰して見ることで、作業管理に有用

などのコメントを得た。管理者としては特に、現在目の届かないところでの「頑張り」を評価することへの有用性や勤務体系のバランス化への一指標として有用であると、

データソリューションと組み合わせた作業管理への応用が期待できるとの意見を得た。

4. おわりに

本稿では、作業負担を可視化し、管理し、作業者の身体負担を軽減する総合的な作業改善を図るための2つのウェアラブルセンサシステムを紹介した。本システムの効果は、作業負担の管理、改善だけでなく、装着者にリアルタイムに負担を知らせることで、危険行動を取らないよう注意喚起することも可能であり、これも1つのアシスト技術である。このようなシステムの運用により、高齢労働者のように身体弱者が安心して働ける作業環境を作り出すことが、少子高齢社会において産業構造を維持することに貢献できると考える。

参考文献

- [1] Y. Imamura, et al., Motion-Based Design of Elastic Belts for Passive Assistive Device Using Musculoskeletal Model, J. of Robotics and Mechatronics, 23-6, 978-990, 2011.
- [2] K. Miura, et al., Humanoid Robot as an Evaluator of Assistive Devices, Proc. of IEEE ICRA2013, 679-685, 2013.
- [3] Y. Imamura, et al., Verification of Assistive Effect Generated by Passive Power-Assist Device Using Humanoid Robot, Proc. of IEEE/SICE SII2014, 761-766, 2014.
- [4] S. Miyajima, et al., Simulation of Effect by Assist Device based on Motion Measurement Using Multiple Inertia Sensors, Proc. of JSME ROBOMECH2016, 2016.
- [5] Y. Tsuchiya, et al., "Estimation of lumbar load by 2D reconstruction of spine line using wearable sensor system," 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), pp.3669 - 3674, 2014.
- [6] Y. Tsuchiya, et al., "Calibration method for lumbosacral dimensions in wearable sensor system of lumbar alignment," The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), pp.3909 - 3912, 2015.
- [7] Alf L. Nachemson: The lumbar spine: an orthopaedic challenge Spine, 1(1), 59-71(1976)
- [8] 瀬尾ほか：腰部負担軽減のための作業再設計支援ソフト，産業衛生学雑誌，40，349，(1998)
- [9] 土谷ほか：ウェアラブル腰部負荷推定システムのための腰仙部寸法校正法，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，1P1-X04，(2015)