

特集 ■ 超高齢社会と VR

高齢社会での社会参加支援のための軽労化[®]技術の研究開発と評価システムの構築



田中孝之

Tanaka Takayuki

北海道大学



奈良博之

Nara Hiroyuki

北海道大学

1. はじめに

本研究では、生きがいを持って働き、生活する元気な高齢者により支える豊かな高齢社会の実現を目指している。そのためには、人の身体機能を可能な限り維持するための技術が必要である。これまでに、パワースーツや増力装置をはじめとした労働支援、作業支援のための様々なアシスト技術が提案されているが、短期的なアシスト効果の評価に留まっており、長期的な視点での設計、評価は実現されていない。

また、健康若年層であっても、作業負担を軽減するためにアシスト技術を必要としている。しかし、過度なアシストは筋力低下、感覚低下を誘発し、身体機能の早期老化、退化を引き起こしかねない。そのため、利用者の身体能力に適したアシストが必要であるが、そのための設計・評価指標やアシスト技術は確立されていない。

人の身体能力を増幅する増力化技術に対して、我々は疲労を軽減し、身体機能を可能な限り活用するアシスト技術として「軽労化[®]技術」を開発している [1]。小型アクチュエータの制御と弾性材により補助するセミアクティブ軽労化スーツである「スマートスーツ[®]」、弾性

材のみにより補助するパッシブ軽労化スーツ「スマートスーツ[®]・ライト」がある (図 1)。

本研究において新たに提案する 3S 軽労化技術には、安全な作業・動作を誘引し、また作業時の疲労、負担を軽減する短期的な効果だけでなく、労働や生活をする上で必要な身体能力や思考能力を可能な限り持続させる長期的な効果を持たせる。3S 軽労化技術とは、3S (Secure, Sustainable and Subliminal) アシスト、つまり、

- ・ Secure : 安全なアシスト
 - ・ Sustainable : 本来の身体機能を維持するアシスト
 - ・ Subliminal : 親和性が高く、さりげないアシスト
- という全く新しい概念に基づいた画期的なアシスト技術である。

本研究の最終目標は、高齢者が生きがいを持って働き、生活できる社会の実現を目指して、各種作業の疲労や負担の軽減と、身体機能維持を目的とした 3S 軽労化技術、およびその評価、設計手法を確立することである。そしてニーズが高い、建設作業、介護作業など、多様な作業に適した次世代スマートスーツを実用化する。

2. 実フィールド試験用スマートスーツの開発

3S アシストの概念に基づいて、メカニズム、制御系共に再設計し、利用者の疲労を軽減するだけでなく、可能な限り身体機能を維持させる「次世代 3S 軽労化スマートスーツ」を開発し、実用化することを目指した。これまでに開発したスマートスーツを基にして、農作業フィールドを想定した「実フィールド試験用スマートスーツ」を開発した。従来のスマートスーツでの改善要望として、着脱性、騒音、歩行時アシスト不要、防水・



図 1 軽労化スーツ「スマートスーツ」「スマートスーツ・ライト」

小型化などが項目として挙げられており、これらを改善することを念頭にして設計を行った。

実フィールド試験用スマートスーツは、4つの機能から構成されている。センサ部は制御部内1個、脚部2個（太もも、すね）により腰・膝の屈曲角を検出し、制御部で駆動モータの動作電流を発生する。駆動部では、動作電流により、モータを駆動し、弾性体につながる紐を緩めたり、巻き取ったりする。操作部では、電源を入り切り、動作モードの設定、動作状態の表示を行う。操作部は胸部に取り付け、ユーザから確認可能にしている。

駆動部、制御部、操作部、センサ部は雨などの水滴の進入を防止する防滴構造としている。また、体に触れる部分に直接発熱部品が当たらない部品配置としている。各部は、できるだけ樹脂品を使用し、軽量化を図っている。各部間の配線も防水性のあるケーブル、コネクタを使用し、野外での使用に配慮している。また、各部を分離したことにより、サポートする部位が変わった場合、配線を変更することで、体に取り付ける位置を変更できるよう、作業の多様性を意識した構成とした（図2）。表1に開発したスマートスーツの仕様を示す。

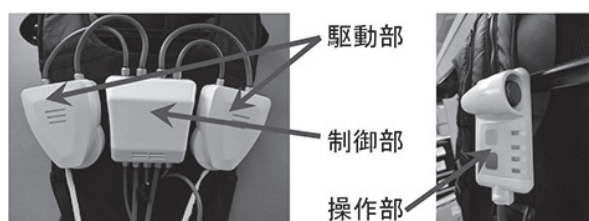


図2 スマートスーツの駆動部、操作部

表1 実フィールド試験用スマートスーツの仕様

モータ	DC12V20W
駆動力	75 N
駆動速度	80 mm/s (50N時)
寸法	駆動部：幅 120 mm×高さ 90 mm×厚さ 50 mm (モータ1基)、制御部：幅 142 mm×高さ 116 mm×厚さ 50 mm、操作部：幅 92 mm×高さ 52 mm×厚さ 39 mm
質量	駆動部（モータ2基）：800 g、制御部：580 g、操作部：120 g
スーツ	胸部ファスナ、脚部バネクロで装着 装着 15 秒程度、脱着 10 秒程度

3. モーションベーストアシスト法に基づいた次世代 3S スマートスーツの制御手法

3.1 作業分析に基づいた補助対象動作の選定

次世代 3S 軽労化技術は様々な作業への適用が期待されているが、現場への導入検討を効果的・効率的に行うためには、対象となる作業を分析整理する必要がある。そこで、OWAS 法に基づき作業をコード化した基本動作の組合せとして扱う単純化手法を検討した。

様々な作業に対する作業コード化の適用度を確認するため、農作業調査のビデオカメラデータを利用し、コード化による整理をすすめた [3]。例えば、上体屈曲角度に着目すると、スマートスーツのアシスト効果が高い、前屈み姿勢の出現割合が容易に把握できた。

また、スマートスーツによる筋力補助が期待できるアシスト領域の中で、姿勢コード遷移がパターン化している動作を整理すると、直立姿勢・前屈姿勢・持ち上げ姿勢・しゃがみ姿勢の4姿勢間をつなぐ、前屈動作・持ち上げ動作・屈伸動作が多数出現するため、これらの姿勢と動作を制御用の動作認識に用いることとした（図3）。

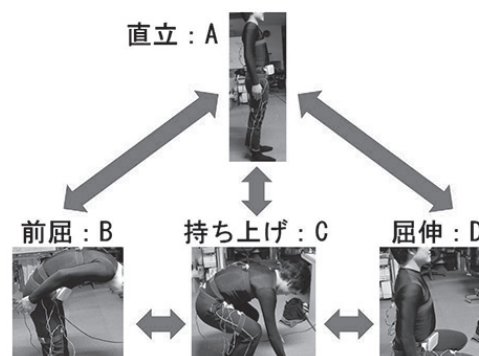


図3 作業分析に基づく補助対象動作

3.2 基本姿勢を用いた基本動作認識

基本姿勢を用いた基本動作認識をするために、加速度・角速度センサを用い、使用者の前屈動作、屈伸動作、持ち上げ動作の各動作中の膝屈曲角度 θ_2 、腰屈曲角度 θ_3 を計測する。得られたデータを θ_2 - θ_3 状態空間に置き換え、線形判別法を用いた動作認識手法で、前屈動作、屈伸動作、持ち上げ動作の認識と判別を行う。SVM に基づいて、この状態空間上に図4に示す動作領域を設定し、スマートスーツ装着者の前屈・屈伸・持ち上げ動作を判別することが可能となる。

3.3 作業多様性に対応した補助力制御の設計

人の動作を3次元動作計測装置で計測し、筋骨格シ

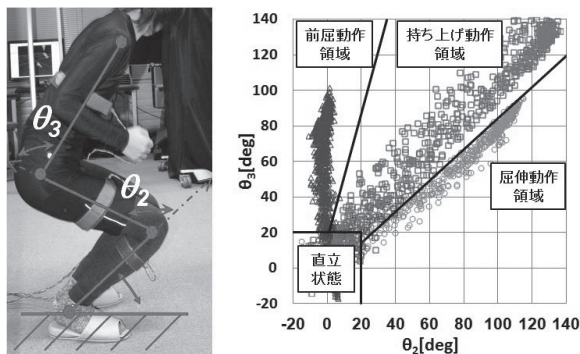


図 4 姿勢計測と動作パターン認識

ミュレータ (SIMM) により計算することで関節角度・角速度に対する筋肉の負荷トルク特性を導き (図 5), 弾性材に期待する補助トルクを発揮させるために必要な弾性材伸張量制御系を構築する。

スマートスーツが制御すべき弾性材伸張量の導出は図 6 の手順にしたがう。弾性材伸張量の導出の手順は,

(1) 筋骨格力学シミュレータにより筋発揮トルクを算出, (2) 弾性材が発揮すべきトルクを算出, (3) トルクを弾性材伸張量から算出, (4) 目標となるアクチュエータの弾性材伸張量を算出する。これにより, モーションベーストアシスト法 [2] に基づいたスマートスーツの弾性材伸張量の最適制御量計算手順を構築することができた。

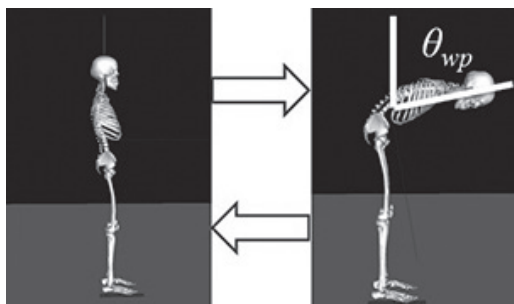


図 5 筋骨格力学シミュレータでの対象動作解析

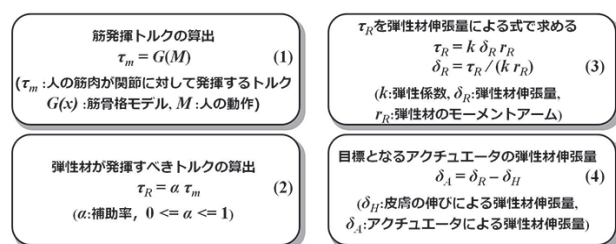


図 6 弾性材伸張量の最適制御量計算手順

4. 酪農作業実フィールド試験による評価

開発した実フィールド試験用スマートスーツの効果検証するため, 搾乳動作時のスマートスーツの有無による筋負担軽減具合を表面筋電位により計測した (図 7). スマートスーツ無しで 3 回, スマートスーツ有りで 4 回の実験を行った。各動作区間においてそれぞれの平均値をとり, その比を負担軽減率とする。実験結果は以下 4 つの動作区間に分けて解析する。

0~5 秒: ミルカーを持って牛まで歩く。

5~10 秒: ミルカー準備後にしゃがむ (中腰)。

10~20 秒: しゃがみ姿勢でミルカーを牛に取り付ける。

20~30 秒: しゃがみから立ち上がり, 計測装置停止。

いずれも図 3 の動作により表現できる。

図 8 に実験での筋負担軽減率の解析結果を示す。前半の動作は, ほとんどが直立での歩行動作やミルカーの準備動作であり, この区間では補助対象である脊柱起立筋の負担軽減効果が見られた。後半の動作は, 完全なしゃがみ動作であり, この区間では脊柱起立筋は負担の増大を示した。一方で, 大腿四頭筋の負担は大きく軽減されている。しゃがみ動作は今回開発したスマートスーツの補助対象外の動作であり, 弾性材を緩めているため脊柱起立筋の補助にはならなかったが, 大腿部の弾性材が大腿四頭筋の負担軽減に寄与したと考え, スマートスーツの筋力補助効果に関して良好な結果が得られた。



図 7 搾乳作業でのフィールド試験

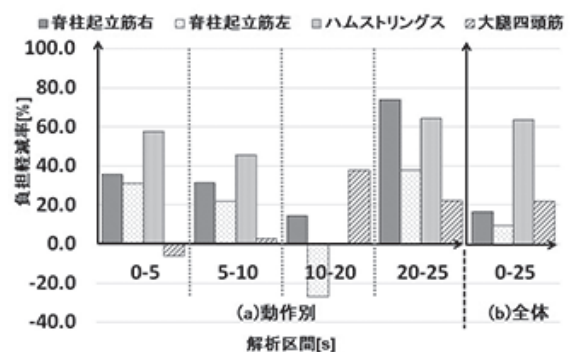


図 8 フィールド試験での負担軽減率

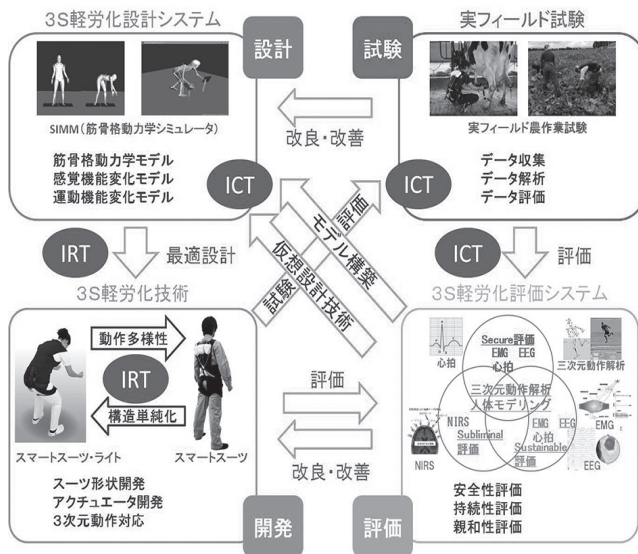


図9 軽劣化プロジェクト構想 *ロ絵にカラー版掲載

5. 3S 軽劣化技術研究開発の全体構想

本研究では「設計」，「開発」，「試験」，「評価」の各分野において，互いに連携やフィードバックを掛けることにより，常に最善の成果を発揮できる体制で研究を遂行するために図9に示す全体構想を構築した。ICT, IRT, 仮想環境設計技術を用いて各分野連携で研究開発を実施することで3S 軽劣化技術および評価システムの開発が可能となり，今後も新たな研究成果の創出が期待できる。

6. おわりに

本研究の関連技術分野である次世代自立支援機器やパワーアシストスーツと呼ばれる機器は，「介護支援ビジネス」と「高齢者・障害者支援ビジネス」の両方の分野に関係する機器であり，最近では作業現場，工場などでの作業支援機器としても注目されている。今後，工場や作業現場での作業を支援し，作業負担を軽減する機器としての展開が期待されている。

超高齢社会の日本の社会情勢や需要が増加している介護労働者，高齢化している農作業従事者などの必要性からも本研究と競合するものも存在するが，3S 軽劣化技術が目指している Secure (安全・安心)，Sustainable (持続性)，Subliminal (親和性) の概念を有する人の手で行う作業の負担軽減を図り，多様な利用形態に合わせた最適設計が可能になる技術に関しては他では見られず，本研究は非常に優位かつ有用性を示し，製品化による市場投入が非常に望まれていると考える。

謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業【戦略的イノベーション創出推進プログラム】(S-イノベ)の支援によって行われた。ここに記して感謝の意を表する。また，北海道大学工学系倫理委員会の承認(海大情第54号)をうけて，実施されたものである。

参考文献

- [1] H. Nara, et al.: Fundamental study on evaluation of KEIROKA (fatigue-reduction) technology in using UD shovel for removing snow by Musculo Skeletal Dynamics Simulator, Proc. of IEEE ROBIO2011, pp.1579-1584 (2011)
- [2] Y. Imamura, et al., "Motion-Based-Design of Elastic Material for Passive Assistive Device Using Musculoskeletal Model", J. Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6, pp.723-730 (2011)
- [3] 吉成ら，筋力補助スーツのための適用作業分析手法の検討，第14回 SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2013) (2013)

【略歴】

田中孝之(TANAKA Takayuki)

北海道大学大学院情報科学研究科 准教授

1996年電気通信大学大学院修士課程修了。同年同大学助手，2001年カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員，2003年電気通信大学助教授，2004年北海道大学助教授を経て，現在同大学准教授。日本機械学会フェロー。軽劣化技術，ウェアラブルロボット，ヒューマンインタフェース，移動ロボットの研究に従事。2008年計測自動制御学会論文賞，2011年ヒューマンインタフェース学会論文賞受賞，博士(工学)。

奈良博之(NARA Hiroyuki)

北海道大学大学院情報科学研究科 博士研究員

慶應義塾大学メディアデザイン研究所国際バーチャルリアリティ研究センター リサーチャー

1994年北海道大学工学部卒業。1996年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。2000年同大学院工学研究科博士後期課程修了。1996年～1999年日本学術振興会特別研究員DC1。2003年～2005年独立行政法人通信総合研究所(現情報通信研究機構)専攻研究員。日本VR学会第3回大会学術奨励賞受賞。生体工学，福祉工学，ヒューマンインタフェースに関する研究に従事。博士(工学)。