軽労化スーツ スマートスーツ

Smart Suit: *KEIROKA* assistive suit田中 孝之^{*1}

Takayuki TANAKA

KEIROKA® assistive system is assistive technology which can reduce fatigue and load of human workers and also can keep their physical performance to perform their work. This tutorial paper describes the concept of *KEIROKA* assistive system and Smart Suit ® as a practical example of *KEIROKA* system. The application of information and robot technology to control and design Smart Suit and its future prospects will be remarked.

Keywords: *KEIROKA* assist, Smart Suit, information robot technology, musculoskeletal dynamic model

(2017 年 1 月 17 日受付)

1 緒言

本稿では、軽労化® [1]の概念と、軽労化技術の具体例としてスマートスーツ®を紹介する（軽労化とスマートスーツは株式会社スマートサポート（軽労化研究会事務局）の登録商標、以下省略）。スマートスーツは情報ロボット技術を活用したアシスト技術である。アシスト技術の社会実装のための課題と解決法についても述べる。

近年、作業支援、生活支援を目的としたアシスト技術の研究開発が国内外で盛んに行われ、実用化も進んでいる。中腰姿勢での腰部負担軽減を目的としたものだけでも、アクティブリンクの AWN-03 [2], CYBERDYNE の HAL® 作業支援用 [3], イノフィスのマッスルスーツ [4]など、既に事業化されているアシストツールも少なくない。

我々は、人の手による作業において作業者の身体負担の軽減を目的とした筋力補助スーツ「スマートスーツ [5]」、「スマートスーツ・ライト [6]」を開発し、一部事業化してきた。これらは、作業者の動作を妨げずに、人の力の一部を補助するように設計されている。このように、人が主体の作業において、人の作業形態を可能な限り維持し、労力や疲労を軽減するためのアシスト技術を、我々は「軽労化技術」と呼んでいる。軽労化技術を含むアシスト技術を広く社会に普及させ

るためには、筋力補助効果やなどの短期的な効果だけでなく、長期的な視点に立った効果を検証しなければならない。また、どのようなアシスト技術であっても、万能なツールは存在しない。多種多様な作業姿勢を強いられる人の手による作業では、アシストツールによってアシストできない、またはレジスト（運動抵抗）となる姿勢、動作も存在する。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。

まず、アシスト手法の 1 つとして軽労化の概念を紹介する。つぎに、農業や介護など、人の手による作業の支援を目的とした軽労化技術の具体事例として、スマートスーツをその設計手法と共に紹介する。最後に、軽労化技術の今後の展開について述べる。

2 軽労化アシスト

各種作業において人の負担を軽減する技術は、作業員を専用機械やロボットに置き換える「機械化・自動化」と、作業員の肉体的、身体能力的な補助を行う「アシスト技術」とに大別することができる。さらに、アシスト技術も 2 つに大別でき、すなわち「増力化技術」と「軽労化技術」である。

増力化技術とは、人の力を増幅することで、人の身体能力では実行不可能な作業を実現するためのアシスト技術である。例えば、重量物搬送や組み付けなどの工場作業を支援するバランスやパワースーツ、歩行訓練リハビリのためのパワースーツなどがあり、これらは人の身体能力を機械的に増幅し、人ができないこと

連絡先：田中孝之，〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目，北海道大学大学院情報科学研究科，
e-mail: ttanaka@ssi.ist.hokudai.ac.jp

^{*1} 北海道大学大学院情報科学研究科

をできるようにするための技術と言える。

一方、軽労化技術とは、人の身体能力の一部を補助し、人の能力で実行可能な作業において、人の労力や疲労を軽減するためのアシスト技術である。人の作業形態を変えずに、人ができることを楽にできるようにするための技術である。作業においては、人の能力が主体となる。軽労化技術においても多くの例で、他のアシスト技術と同様に、情報ロボット技術 (IRT) や情報通信技術 (ICT) に基づき、人間中心の設計・開発が行われている。我々は、軽労化技術のコンセプトとして以下の3項目からなる「3S アシスト」を提案している。つまり、Secure assist (安全なアシスト)、Sustainable assist (持続的なアシスト)、Subliminal assist (さりげないアシスト) である。

特に、過度なアシストは作業者の基礎体力を衰えさせる危険性が懸念されている。我々は、アシスト効果と筋力低下との関係について実験的に調査し、過度なアシストを行った場合、筋力低下が生じることを確認し、作業負荷と筋力増減との関係を数理モデル化した [7]。軽労化では、基礎体力を維持しつつ、疲労を軽減することを目標としている。

3 スマートスーツの補助メカニズム

我々が開発した筋力補助スーツ「スマートスーツ (Fig. 1a)」および「スマートスーツ・ライト (Fig. 1b)」は、人の作業形態を維持可能な「装着型軽労化技術」である。いずれも弾性材を補助力源とし、受動要素によるバックドライバビリティを持つことで基本安全な補助機構を実現している。

3.1 スマートスーツとセミアクティブアシスト機構

スマートスーツはセミアクティブアシスト機構を搭載した軽労化スーツである。

セミアクティブアシスト機構とは、弾性材の伸長に伴う弾性力を補助力とし、その伸長量を小型モータによって調整することで補助力を制御するアシスト機構である。同機構を搭載した、小型軽量で人に優しいアシスト装置がスマートスーツである。

基本的に弾性体 (ゴム) の変位に伴う弾性力を補助力として用いるパッシブな筋力補助装置であり、小型かつ軽量であり、装着者に無理な力が加わることがなく安全である。また、利用者の姿勢を計測するセンサを内蔵しており、補助力が動作を妨げないように、弾

性体の発する補助力を調整している。補助力の調整は、ワイヤを介して小型モータによって弾性体の伸長量を制御することで実現している。

Fig. 2 にセミアクティブアシスト機構の概要図を示す。ここで、同機構により得られる補助トルク τ_w は、

$$\tau_w = dF_s \quad (1)$$

である。ここで、 d はモーメントアーム長、 F_s は弾性材が発する補助力であり、次式で得られる。

$$F_s = K\delta = K(\delta_h(\theta) + \delta_s(\theta, \dot{\theta})) \quad (2)$$

(a) Smart Suit

(b) Smart Suit Lite

Fig. 1 Smart Suit: KEIROKA assistive suit for fatigue/workload reduction

Fig. 2 Semi-active assist mechanism installed on Smart Suit

ここで、 K は弾性材の弾性率、 $\delta_h(\theta)$ は人体の関節の伸び、 $\delta_s(\theta, \dot{\theta})$ はモータによる制御量、 θ は関節角度である。 δ_h は関節角度により得られる値であり、 δ_s は後述のモーションベースドアシスト技術によって設計される。つまり、スマートスーツでは補助対象部位の筋力を計測することなく、人の動作を計測し、それに基づいて補助力を最適化していることに特徴がある。

3.2 スマートスーツ・ライト

スマートスーツ・ライトは弾性材のみによるパッシブな筋力補助スーツであるが、後背部の筋力補助だけでなく、体幹を安定化させる機能を併せ持っている。従来開発されてきた筋力補助装置の多くは、腰の屈伸時に脊柱起立筋に代表される直接運動に関わる筋肉、いわゆるグローバル筋群を補助するものであった。一方、腰痛症予防のための補助具としてコルセットの有効性が知られ、発症後のリハビリにも用いられている。コルセットは、骨盤周りをストレッチ材等で締め付けることで、腹腔内圧を高めることで関節剛性を高め、体幹を安定化させるものである。腹横筋など、運動には直接寄与しない、ローカル筋群を補助する装具である。

ここで、腰痛症予防のためには、グローバル筋群だけでなくローカル筋群もバランス良く補助することが有効であると言われている。そこで、筋力補助効果と体幹安定化補助効果とを併せ持つ Dual Back Support 技術を搭載した SSL を開発した。後背部に配置した弾性材により補助力を得るパッシブ型 PAS である。弾性材の一端は胸部パッドに固定されており、後背部から脚部に配し、動滑車を介してその一端を腰部に固定している。腰まわりベルトの固定位置を調整することで、装着者の体形に弾性材長さを適合でき、かつ作業負荷に応じて補助力を調整できる。

Fig. 3 は装着者の側面・背面から見た模式図であり、2 次元的に補助のメカニズムを示している。また弾性材配置は動滑車構造となっている。これは片側の弾性材をモデル化したもので、弾性力 F_1 を発生する上半身の弾性材 R_1 と、弾性力 F_2 を発生する脚部の弾性材 R_2 が動滑車 B によってつながれている。装着者が姿勢を変化させた際の AC 間の伸びを Δl_{AC} 、弾性材の弾性係数を k 、弾性材のモーメントアームを r_s すると、腰関節、股関節を伸展させる補助トルク τ_{s12} および腰周り締め付け力 F_t は以下のように作用する。

$$\tau_{s12} = \frac{6}{5} r_s k \Delta l_{AC} \quad (3)$$

$$F_t = \frac{2}{5} k \Delta l_{AC} \quad (4)$$

腰部負荷は腰を深く屈めるほど大きくなることが知られている。装着者が腰を屈めるほど弾性材伸長量 Δl_{AC} が増大するため、負担の大きい姿勢になるほど τ_{s12} 、 F_t とともに大きくなり、大きな補助効果が得られることがわかる。

アクティブな要素を有するスマートスーツと異なり、スマートスーツ・ライトでは他動的に弾性材伸長量を調整することはできない。そこで、後述するモーションベースドアシスト技術によって、動作と筋力、弾性材の伸長量との関係から、対象動作を補助するに最適な弾性材の配置と特性を得ている。

4 情報ロボット技術による補助力最適化

4.1 モーションベースドアシスト技術

スマートスーツ、スマートスーツ・ライト、いずれも弾性材を補助力源としている。スマートスーツでは小型モータにより弾性材伸長量を制御し、式(2)のとおり補助力を調整している。また、スマートスーツ・ライトでは、姿勢変化による体表面長の変化に伴い弾性材伸長量が変わることによって、式(3)、(4)のとおり、補助力・締め付け力を得ることができる。

我々は、スマートスーツの弾性材伸長量制御系、スマートスーツ・ライトの弾性材配置・特性の設計に、情報ロボット技術である筋骨格力学モデルを用いて、それらを最適化するモーションベースドアシスト技術を開発した。ここでは、スマートスーツ・ライトの弾性材配置・特性の最適化の概要について紹介する。

Fig. 3 Dual back support technology: assist mechanism of Smart Suit Lite

4.2 スマートスーツ・ライトの最適設計

スマートスーツ・ライトのようなパッシブ型アシストシステムには、装置の構造と補助力源の特性によって得られる補助効果が一意に決まるという特徴がある。これまで、アクティブ型アシストシステムでは生体をセンシングすることにより筋負担に合わせた能動的な補助力制御が行われているのに対し、パッシブ型では静的条件や拘束条件などからアシスト力が設計され、動的な負担が考慮されていなかった。しかし、特定の動作に合わせた補助を行うためには、その運動負担を考慮に入れた装置の設計が必要である。現在、身体筋骨格系の負担を定量的に評価し制御則等の設計を行う手法として、身体力学系をモデル化する解析手法が多く用いられるようになってきている。

我々は身体力学系モデルを用いた動作解析により動作と身体負担の関係をあらかじめ定量化することで、介護作業の動的な負担に対して所望の補助効果を実現する、情報ロボット技術に基づくスマートスーツ・ライトの弾性材特性と配置の最適設計手法、モーションベーストアシスト技術を開発した (Fig. 4)。その概略を以下に示す。詳細は文献[6]を参考にされたい。

- (1) 補助対象動作を解析し、補助対象部位を特定する。
- (2) モーションキャプチャシステムを用いた 3 次元動作計測により、補助対象動作の 3 次元データを取得する (Fig. 4(a))。
- (3) 補助対象動作を筋骨格力学モデルによって解析し、補助対象筋の発揮力とモーメントアーム、関節トルクを求める (Fig. 4(b))。
- (4) スキンセグメントモデル (幾何学モデル) によって、補助対象部位で得られる補助トルクを最大化する弾性材配置を決定する (Fig. 4(c))。
- (5) 所望の補助率を実現するための弾性係数を決定する。

Fig. 1(b)に示すスマートスーツ・ライトは、ベッドから車いすなどへの移動を助ける移乗介助において後背部筋群の負担を 25%軽減するように設計した試作品である。擬似的な移乗介助動作の被験者実験において (Fig. 5(a))、設計値どおりに背筋の負担が平均 24.4%軽減していることを確認した (Fig. 5(c))。

また、人間では困難な再現性と信頼性の高い評価を外形が女性体形に近いヒューマノイドロボット HRP-4C を用いて実施した[8]。HRP-4C にスマートスーツ・ライトを着用し (Fig. 5(b))、移乗介助を模した前屈運動を行ったところ、腰の関節トルクが非装着時に比べて 25.8%軽減していることを確認した (Fig. 5(d))。昨今、このようなヒューマノイドロボットを用いたアシスト技術の評価が進められており、その先駆けとなった。

5 スマートスーツの社会実装

札幌市内病院において、病院に勤務する介護職 20 名を対象として、スマートスーツ・ライトによる補助効果を検証する臨床試験を行った。被験者はスマートスーツを着用して半日勤務し、通常の勤務時と疲労感等を比較し、全身と腰部の負担軽減効果を 6 段階で評価したところ、全身では 75%、腰部では 85%の被験者が負担軽減効果を感じていることが確認された。高い補助効果は確認できた一方で、着用による蒸れや締め付けなど、着衣としての装用感の問題が指摘された。

Fig. 4 Motion-based assist for designing assist control and mechanism of Smart Suit and Smart Suit Lite

(a) Experiment by human subject

(b) HRP-4C

(c) Difference of EMG signal between wearing/unwearing Smart Suit Lite (SSL)

(d) Difference of torso torque of HRP-4C between wearing/unwearing SSL

Fig. 5 Verification of assistive effect of Smart Suit Lite by experiments of human subject and humanoid robot HRP-4C

そこで、素材や補助力伝達部である胸部・脚部パッド形状の見直しを行った改良版を開発した。通気性が高く、圧迫感を抑えたデザインとした。開発した改良版を用いて、札幌市内特別養護老人ホームにおいて、介護職 30 名を対象として 4 週間の臨床試験を行った。改良版着用と非着用でそれぞれ 2 週間ずつ、通常の勤

務を行ってもらい、疲労感の主観評価ならびに長期使用時の体力の変化を調べた。スマートスーツを装着することにより、非装着時に比べて疲労感の増加量が、全身では 12.2% (危険率 6.1%)、腰部では 13.6% (危険率 5%未満)、それぞれ減少していることが確認できた。また、スマートスーツを装着した場合でも補助対象筋である背筋力の減衰は見られないことが確認でき、そのほかの体力レベルにも装着による影響はないことを確認した。つまり、開発コンセプトとして掲げる疲労軽減と身体機能の維持を実現した[9]。

現在、スマートスーツ・ライトは、株式会社スマートサポートより試験販売を実施しており、介護、農業、物流など様々な場面で使用されている。Fig. 6(a)および(b)に、それぞれ農業と介護での使用風景を示す。

(a) for agricultural work

(b) for nursing care

Fig. 6 Application examples of Smart Suit Lite

6 スマートスーツの導入診断

様々なアシストツールが実用化されているが、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る。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。

そこで、我々は必要最小限の小型慣性センサを作業者に取り付け、一連の作業動作を連続的に計測し、筋骨格力学モデルを用いて作業負担とアシストツールの補助効果、軽労化効果を見積もる手法を開発した[10]。これによって、作業者の筋骨格系障害の原因を把握するとともに、アシストツールの適用可能性を導入前に検証することが可能である。具体例として、スマートスーツの軽労化効果推定システムは次の4つの機能から構成される。

- (1) 簡易作業動作計測機能：複数の慣性センサ（加速度・ジャイロセンサ）を作業者に装着することで、作業中の動作を計測する。
- (2) 動作変換機能：慣性センサで計測した各部の加速度、角速度より、デジタルヒューマンモデル（筋骨格力学モデル）に適合した動作に変換する。
- (3) 作業負担算出・記録機能：筋骨格力学モデルを用いて作業中の身体負担を計算する。
- (4) スマートスーツ補助・負荷力計算機能：筋骨格力学モデル上に表現したスマートスーツモデルを用いて、スマートスーツが作業者に与える補助力、負荷力を計算する。

Fig. 7 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。

(a) Inertia sensors for wearable motion capture

(b) Estimation of KEIROKA assistive effect on factory work
Fig. 7 Pre-introduction diagnosis of Smart Suit Lite based on motion analysis using wearable sensors

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。この例では、スマートスーツによる関節負担軽減効果（軽労化効果）が 23.5%と見積もられた。また、スマートスーツによって補助できない作業もあり、作業時間のうち 3%は逆に負担がかかる作業があり、そう作業時間に対する補助可能時間（補助率）が 97%であることも確認できる。

万能なアシストツールはない。作業者が腰痛を訴え、腰の負担を緩和したいといっても、一連の作業分析をした上で、腰の負担の要因を把握し、アシストツールの導入が妥当であるかを総合的に検討すべきである。

7 結言

人の手による作業において、軽労化の概念に則って、作業者の疲労を軽減しつつ、基礎体力を維持することで、長く健康に働ける社会づくりが実現できるものと考ええる。既に到来している少子高齢社会では、労働者の確保が急務とされており、様々な分野で定年延長、高齢者労働の必要性が言われている。本講演で紹介したスマートスーツなどの軽労化技術が、そのような社会づくりの一助になればと考える。筆者らは、産学共同研究体「軽労化研究会」を組織し、各分野への「軽労化」に対する理解促進に努めている。興味のある方は、研究会ホームページ <http://keiroka.org> をご覧いただき、研究会へ参加いただきたい。

参考文献

- [1] 田中, 3S アシスト : 軽労化技術のコンセプト, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011 (2011).
- [2] アクティブリンク株式会社, アシストスーツ AWN-03, <http://activelink.co.jp/doc/1672.html>
- [3] CYBERDYNE 株式会社, What's HAL®, <http://www.cyberdyne.jp/products/HAL/index.html>
- [4] 株式会社イノフィス, 「マッスルスーツ®とは」, <http://innophys.jp/about/>
- [5] T. Kusaka, T. Tanaka, et al., Assist Force Control of Smart Suit for Horse Trainer Considering Motion Synchronization, *International Journal of Automation Technology* 3(6), 723-730 (2009).
- [6] Y. Imamura, T. Tanaka, et al., Motion-Based-Design of Elastic Material for Passive Assistive, *Journal of Robotics and Mechatronics* 23(6), 978-990 (2011).
- [7] S. Ando, Takayuki Tanaka, et al., A Proposal for a Model of Change of Maximum Isometric Muscle Force in Step-Change Workload, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 25(6) 1050-1059 (2014).
- [8] K. Miura, et al., Humanoid Robot as an Evaluator of Assistive Devices, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* 2013, (2013).
- [9] 今村, 田中, 瀧澤, 介護作業用アシスト装具による軽労化効果と体力変化に関するフィールド試験結果, 看護理工学会誌, 2(3) 142-149 (2015).
- [10] S. Miyajima, T. Tanaka, et al., Lumbar Joint Torque Estimation based on Motion Measurement using Multiple Inertial Sensors, *Proceedings of IEEE EMBC2015*, 6716-6719 (2015).