

空気圧ゴム人工筋肉を用いたアシストスーツの下肢補助機能及び腰部保護機能の性能評価試験

Assistive effectiveness evaluation tests of a lower limb assistive function and a lumber protection function in a pneumatic rubber artificial muscle assist suit

戸森央貴*, 三土手志苑*, ○虎岩悠太*,

Tomori Hiroki*, Mitode Shion*, ○ Toraiwa Yuta*,

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：スマート農業(smart agriculture), 内骨格アシストスーツ(endoskeletal assist suit), McKibben型人工筋肉(McKibben-type artificial muscle),

連絡先：〒992-8510 米沢市城南4-3-16 山形大学工学部機械システム工学科 戸森研究室
戸森央貴, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tomori@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

今日の日本の農業は基幹農業従事者、新規就農者数共に減少が続いている。高齢化も進行している。農林水産省令和6年度食料・農業・農村白書によると、基幹農業従事者数は2000年に240万人だったが、2024年には111万人と半減している。平均年齢もこの25年で7歳増加している。新規就農者数は4.3万人であるが、その半数に当たる2.25万人が60歳以上の高齢者である¹⁾。その結果、労働力が不足し、耕作放棄地の増加や産業の衰退が進む。

労働力不足対策として国を挙げてスマート農業を推進している²⁾。自動操舵システムやロボットトラクタによる作業量の軽減や経営データ管理による生産効率の向上を通じて、少ない人數で高い生産性を目指している。しかしながら

課題も多い。従来の農地の構造はロボットの移動・通過に適しておらず、この環境に適応した自動制御技術の開発に時間がかかっている。対策として、逆に農地をロボットの使用を前提とした構造とすることで、自動管理・収穫を実現している。しかし農家に農地構造の変更を迫る上に、農地構造の変更に時間がかかる。特に果樹は生育に時間がかかるため、導入から効果が得られるまでのタイムラグも大きい。また経営データ管理も結果が見えるまで時間がかかる可能性が高く、適切に運用するハードルも高い。

一方スマート農業の中にもドローンや、身体の負荷を軽減するアシストスーツなど環境を問わず導入可能で、運用のハードルが小さい物もある。特にドローンは従来よりラジコンヘリを使用してきた実績もあるため、農家の間でも広く受け入れられている。農薬・肥料散布のみな

らず、ドローンの滞空能力を用いた利用も増えているようである³⁾。しかしアシストスーツは広く受け入れられているとは言い難い。考えられる理由として、農家の作業の多様性がある。農家は重量物の運搬だけでなく、同じ姿勢で長時間の軽作業、軽トラの運転など多種多様である。そのため特定の作業専用のアシストスーツがあり、負担の軽減が得られたとしても、他の作業に支障が出る場合は導入されない。特に収穫繁忙期は運転をする機会が多い農家は装脱着を手間と感じて、使わなくなると考えられる。まだ普及が始まったばかりとはいえ、導入を見送る農家もいると考えられる。

そこでこれらの課題を解決するべく、当研究室で研究している空気圧ゴム人工筋肉を用いた農業向け内骨格型のアシストスーツを開発する。そして開発したアシストスーツの性能を評価するべく、被験者を集めて性能評価試験を行い、補助効果を評価する。なお本実験は被験者がいることから山形大学倫理審査委員会による審査(R07-19)を受け通過している。

2. アシストスーツ

2.1 アシストスーツ概要

Fig. 1, Fig. 2 は開発したアシストスーツ前後の外観である。市販されているつなぎを素体に人工筋肉が体表に密着するように取り付けてある。この構造と人工筋肉自体の柔軟性により、着用者は動作を阻害されることなく動くことができ、車両の運転も行うことができる。各人工筋肉はナイロンベルト、樹脂製バックルでつなぎに接続している。ここで構成要素は大きく4つに分類される。

1) 下肢補助機構

2) 背筋補助機構

3) 腹筋補助機構

4) 制御部

注意すべきは補助効果には種類があり、一般にアシストスーツと呼ばれるものは関節に補助トルクを加えることを目的としている。一方我々のアシストスーツの補助はサポートやコルセットに近い方向性であり、姿勢を支え、長時間の維持の補助を目的としている。



Fig. 1 A suit front



Fig. 2 A suit back

2.2 アクチュエータ

本アシストスーツに使用しているアクチュエータは空気圧ゴム人工筋肉である。空気圧ゴム人工筋肉の基本原理として、ゴムチューブと繊維で構成されており、チューブに圧縮空気を送り込むことでチューブに膨張が生じるが、繊維拘束により径方向の膨張が軸方向の張力へ変換され、人工筋肉は収縮する。この張力で身体動作を補助・腰部の保護を行う。

ここで実際に使用した2種類の人工筋肉について説明する。これらの人工筋肉を後述する補助機構で、性質に合わせて使い分けている。

2.2.1 McKibben型人工筋肉

McKibben型人工筋肉 (Fig. 3) はゴムチューブと編み込みスリーブで構成されている。圧縮空気を送り込むことでゴムチューブが膨らみ、編み込みスリーブの編み込み方向が変わる。これにより人工筋肉の全長は収縮し短くなる。

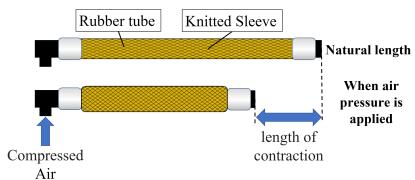


Fig. 3 McKibben type artifical mascle

2.2.2 状態遷移式人工筋肉

状態遷移式人工筋肉（以下 MSPAM）(Fig. 4) は McKibben 型人工筋肉をベースとしており、スリーブに余裕を持たせることで、引張荷重で伸長するようにした人工筋肉である。伸長時はゴム自身の弾性力で収縮力が生じる。

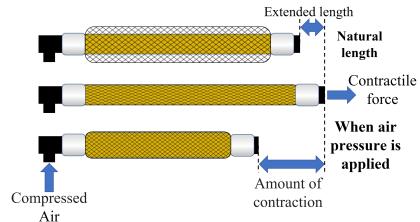


Fig. 4 MS-PAM

2.3 補助機構

2.3.1 下肢補助機構

下肢補助機構は4本のMSPAMで構成されている (Fig. 5)。腰の後ろを始点とし、臀部から膝を通りアキレス腱まで1本の長い人工筋肉が途切れることなく通っている。この機構で立ち上がる力、中腰の少し足を曲げた姿勢の維持を補助する。人工筋肉の通過経路は人体の筋肉配置を参照しており、大殿筋、大腿四頭筋、下肢三頭筋を通過している。



Fig. 5 A front of Leg Assist Fancion

2.3.2 背筋補助機構

背筋補助機構は2本のMcKibben型人工筋肉で構成されている (Fig. 6)。腰部を始点とし、脊柱起立筋を通過して肩を終点としている。この機構で腰椎の伸展を補助し、腰を曲げた姿勢の維持する。

2.3.3 腹筋補助機構

腹筋補助機構は腰痛の予防のために腹圧を高める機構であり、McKibben型人工筋肉とMSPAM



Fig. 6 Back Assist Function

を2本ずつ、計4本の人工筋肉で構成されている(Fig. 7)。ここで腹圧と腰痛の関係について説明する。腹圧が高い状態では骨盤・腰椎の傾きが起きてこの状態で固定される。腹圧が低くなると骨盤・腰椎の傾いてしまい、負荷がかかり、腰痛となる。そのため、腹筋補助機構によって外部から腹圧を高めて腰痛を予防する。腹部に巻き付けるように取り付けられた人工筋肉が収縮することで、腹部が圧迫されて腹圧が上昇する。



Fig. 7 Body Assist Function

3. 性能評価試験

3.1 試験概要

前項で論じてきた開発したアシストスーツについて、その補助効果を計測するために、被験者を募り性能評価試験を実施する。対照実験を3種類の運動試験を行う。1種類の試験は3つの条件で比較する。3つの条件は以下の3項目である。

1) アシストスーツを着用せず、私服で運動する

2) アシストスーツを着用するが、駆動しない

3) アシストスーツを着用し、駆動する

試験では4項目の計測を行う。項目は、心拍数・重心動搖距離・腹圧・アンケートの4つである。詳細は後述の3.4計測項目にて論ずる。

また被験者は山形大学の20代の学生から募集し、応募者に対して試験を実施した。なお本実験は被験者がいることから山形大学倫理審査委員会による審査(R07-19)を受け通過している。

3.2 試験手順

ここで性能評価試験の試験手順について説明する。試験は大きく分けて5つの段階に分けられる。

1) 事前準備

2) 運動試験1回目

3) 運動試験2回目

4) 運動試験3回目

5) 終了時アンケート

運動開始前に安静時の心拍数・重心動搖距離を計測する。また実験機器の調整を行い、被験者に合わせる。

運動試験は3つの条件を変更しながら、試験を3回繰り返す。1試験について、まず始めに腹圧の計測を行う。計測する姿勢は4種類であり、直立姿勢と3種類の試験の姿勢である。腹圧計測後小休止を取ったのち、運動試験を行う。運動中の心拍数を計測する。運動終了後重心動搖距離を計測する。ここまでを1試験目として、十分な休養を取ってから条件を変えて2試験目、3試験目と続けて試験を実施する。

試験終了後、被験者に記述アンケートを記載してもらう。

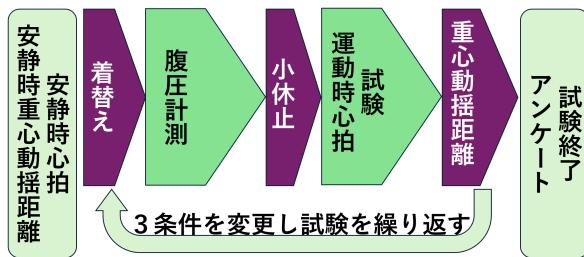


Fig. 8 Flowchart in Assistive effectiveness evaluation tests



Fig. 9 届んだ姿勢での作業

3.3 試験内容

以下は運動試験の詳細な内容である。いずれの運動も運動強度は高くないが、運動時間を長くすることで運動負荷を上昇させて補助効果の有無がわかりやすくなるようにしている。

3.3.1 中腰試験

中腰試験は中腰姿勢で作業を行う運動試験である (Fig. 9)。腰ほどの高さの台上に PC を置き、簡単な PC 作業を行う。作業姿勢は膝を伸ばし、腰を曲げて、上半身は作業が行える適当な姿勢である。試験時間は 15 分間である。被験者の体調管理のため、途中で伸びなどの試験に影響しない範囲で小休憩を許可した。

試験の際に駆動させる補助機構は背筋補助機構及び腹筋補助機構である。

3.3.2 平棚試験

平棚試験は目線の高さに吊るした金網の下で作業を行う運動試験である (Fig. 10)。この運動はブドウ栽培などに用いられる平棚の下での農作業を模している。作業は吊るした金網の下で、頭をぶつけないように気を付けてもらいうがら、金網にひっかけた S 字フックをかけ替える作業を行った。作業姿勢は膝・腰を少し曲げ、



Fig. 10 tana 姿勢での作業

3.3.3 運搬試験

運搬試験はおもりを入れたコンテナを運びながら往復する運動試験である (Fig. 11). 被験者の体重の 20 % の重さになるように調節したコンテナを持ち、5 メートルを往復する。端に着いたならば、一方では床にコンテナを置いて、一度手を放してから再び持ち上げ、もう一方では机の上にコンテナを置いて、一度手を放してから再び持ち上げる。試験時間はこの試験のみ、6 分である。これは重量物の運搬は運動強度が高いためである。

試験の際に駆動させる補助機構は下肢補助機構、背筋補助機構、腹筋補助機構の全てを駆動させる。ただし、下肢補助機構は特殊な駆動のさせ方をする。運搬のために歩行する際は、下肢補助機構は駆動させない。コンテナを床に置き、そこから立ち上がる際に、数秒だけ下肢補助機構を駆動し、立ち上がり運動を補助する。



Fig. 11 move 姿勢での作業

3.4 計測項目

3.4.1 心拍数

心拍数は運動強度を定量化するのに用いる。運動強度はトレーニングインパルス法 (TR-IMPs)

という計算方法で算出し、安静時心拍数・運動時平均心拍数・最大心拍数（年齢から算出）から計算する。以下は計算式である。

※ Y は男女の負荷補正

$$\frac{HR_{ave} - HR_{rest}}{HR_{max} - HR_{rest}} * Time_{work} * Y = TRIMPs \quad (1)$$

平均心拍数は Polar 社製スポーツ向けスマートウォッチと光学式心拍センサーで計測した。

3.4.2 重心動搖距離

重心動搖距離は疲労度を定量化するのに用いる。重心動搖距離とは人間の重心の水平面における移動距離である。人間の重心は常に揺れ動いているが、疲労が大きくなるほど揺れが大きくなる。そこで移動距離を比較することで、疲労度を比較することができる。

この時、被験者の体格によって、同じ重心動搖角度であっても重心動搖距離が変化してしまう。そこで重心動搖距離計測の重心高さの正規化を行い、個人差を排して比較を行う。

重心高さ x 、重心移動距離 a 、正規化高さ x_N 、正規化重心移動距離 a_N としたとき、

$$x : a = x_N : a_N \quad (2)$$

$$a_N = \frac{x_N}{x} * a \quad (3)$$

この式 (3) より計測した重心移動距離に係数を掛けることで簡単に正規化できることがわかる。

重心動搖距離はバランス Wii ボードと WBBSS (Wii ボードを重心動搖計にするソフト) を使用して計測した。

3.4.3 腹圧

腹圧は腹部にエアバックを密着させることで疑似的に計測する。正確な腹圧を計測する場合、膀胱内圧を測定する必要があり、非常に手間と安全管理のコストがかかる。そこで本実験では

腹部に空気を入れたエアバックを密着させ、外側から押さえつけて固定することで、疑似的な腹圧を計測する。

計測の際にはエアバック内部の空気の体積を一定にする必要がある。そこでエアバックを平らな水平面に置き、ハンドポンプで空気を送る。エアバックの圧力が基準に達した時に空気の注入をやめることで、内部の空気の体積を一定にする。

計測機はarduino nano にSparkFun 製Qwiic小型圧力センサを使用している。

3.4.4 アンケート

アンケートにより主観的な疲労度を計測する。アンケートは2種類行い、スライダーアンケートと記述アンケートである。

スライダーアンケートは左右にスライドできるスライドバーを用いて主観的な疲労度を申告する。このとき3回の試験のスライダーアンケートが並べてあり、後からスライドを変更することもできるため、3条件の相対的な疲労度の違いを設定することができるようになっている。記述アンケートは各試験について感想を求めた。

4. 結言

研究目的として既存製品の課題を解決した農業向け新型内骨格アシストスーツを開発することがある。そして今回開発したアシストスーツの性能評価のための性能評価試験について述べた。

現在性能評価試験を実施しており、まもなく試験が終了する。実験結果をまとめ、評価する。

参考文献

- 1) 令和6年度食料農業農村白書第1部第2章農業の持続的な発展第3節担い手の育成・確保と

多様な農業者による農業生産活動、農林水産省(2025.5),127/130

https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r6/pdf/1-2-03.pdf (Accessed in Dec 2025)

- 2) スマート農業をめぐる情勢について (R7.11月版)、農林水産省(2025.11),1/84
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/smart_meguji.pdf (Accessed in Dec 2025)
- 3) 令和6年度農業分野におけるドローンの活用状況、農林水産省(2024.12),1/9
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/drone-184.pdf> (Accessed in Dec 2025)
- 4) 岩崎春樹、新家寿健、池田知純、垣本 映、西澤字一、遠山茂樹：農業用パワーアシストスーツ装着による収穫動作の疲労軽減評価、2019年度精密工学会春季大会、386/387 (2019) doi: 10.11522/pscjspe.2019S.0_386
- 5) 大谷 俊介、織田 成人、渡邊 栄三、安部 隆三、大島 拓、服部 憲幸、仲村 志芳、松村 洋輔、橋田 知明：特集：Abdominal Compartment Syndrome の病態と治療 Abdominal Compartment Syndrome の病態と集中治療、日本腹部救急医学会雑誌、33-5, 823/827 (2013) doi: 10.11231/jaem.33.823
- 6) 兵頭勇己: 資料公開
<https://researchmap.jp/yhyohdoh/> 資料公開