

リンゴ栽培作業支援のための上肢パワーアシストスーツの開発

Development of the Power Assist Suit for Upper Limb to Support an Apple Cultivation Work

○大西章寛*, 長井力*, 佐川貢一*

○ Akihiro Onishi*, Chikara Nagai*, Koichi Sagawa*

*弘前大学

*Hirosaki University

キーワード： パワーアシスト (Power Assist), 上肢重量補償 (Upper Limb Weight Compensation),
筋電位 (Myogenic Potential), ウェアラブル (Wearable), リンゴ栽培 (Apple Cultivation)

連絡先： 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地
弘前大学大学院理工学研究科 知能機械工学コース 佐川研究室
大西章寛, Tel.: (0172)36-3649, E-mail: h19ms607@hirosaki-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 日本の農業が直面する問題として, 農業従事者の高齢化がある. 農林水産省の農業労働力に関する統計によると農業就業人口 175.3 万人のうち 120 万人が 65 歳以上であり, また 15 歳から 59 歳の農業への就業人口が年々減少している¹⁾. 青森県は同様の問題から耕地面積が減少し, 生産力が低迷している¹⁾. 青森県の特産物であるリンゴの栽培作業では, 手を肩より高い位置に挙げた状態で作業するため肩への負担が大きく, 高齢者にとって大変な作業であるという特徴があり, 作業効率が低下している. このような状況から, 上肢の負担を軽減し一人ひとりの作業効率を向上させるパワーアシストスーツを使用し, 生産力の回復させる試みが行われている²⁾. 上肢を補助するパワーアシストスーツは, 現在までに農業用, 医療用含め開発されている. バネや電磁ブレーキを使用した受

動的に姿勢を保持する機構や, 筋電位を使用してモータを駆動する機構などが提案されている. しかし, バネや電磁ブレーキを使用する場合は, パワーアシストスーツを操作するために直感的でない特殊な操作が必要であり, 任意の位置まで腕を動かす動作の負担となる. また, 筋電位を制御に使用する場合は, 電極を肌に直接貼るため装置装着時の煩雑さが問題となっている.

本研究では, リンゴ栽培作業中の上肢の負荷軽減支援を目的とするパワーアシストスーツを開発する. モータを使用しアクティブに運動をアシストし, 筋電位を使用しなくても直感的な操作が可能であり着脱が簡単という特徴を持ち, なおかつ栽培作業の妨げにならない構造及び自由度を持つパワーアシストスーツを開発する. 開発したパワーアシストスーツは実際の農作業を想定し, 関節可動域を計測する機構評価実験及び筋電位から身体負荷を計測する機能評価実験を行い, 有用性を評価する.

2. 機構

2.1 設計方針

今回開発するパワーアシストスーツは、以下の機能を持つことを目標とした。

- (1) 上肢の重量を補償するアクティブ制御
- (2) 装着者が直感的に操作を行え、着用が簡単
- (3) 装着者の肩 3 自由度、肘 1 自由度の運動を追従し、栽培作業に影響を及ぼさない構造
- (4) 片側 1 台のモータを有するシンプルな構造

これらの要求仕様に加え、使用時の利便性や安全性を考慮し暴走が起きても安全であること、各関節の可動範囲を超えてアシストスーツが動作しないことを設計指針として加えた。

2.2 構造

開発したパワーアシストスーツを Fig. 1 に示す。パワーアシストスーツは背中に背負い、装着者とは肘部分で接続する。大きさは、高さ 60 cm、幅 82.7 cm、奥行き 47.0 cm、重さ 10 kg である。Fig. 2 に開発したパワーアシストスーツの構造を示す。体幹に近いところから第 1 関節、第 2 関節、第 3 関節、第 4 関節とする。第 1 関節、第 3 関節、第 4 関節は自由に回転する関節である。第 4 関節にはロードセルを搭載し、肘部にかかる力を計測する。第 2 関節はモータで駆動され、横断面上を垂直に回転し、第 2 関節以降の機構の重量および人間の上肢の重量を補償する。また、リングの栽培作業を阻害しない速度で動作する。

モータは以下のように選定した。支える重量は、装着者の腕の重さとアシストスーツの一部重量の和である。体重 65 kg の男性の場合、人間の腕の重さは約 3.2 kg⁵⁾、アシストスーツの第 2 関節以降の機構の重量は約 1 kg である。また、リング栽培作業時の腕の上下動の角速度を 90 deg/s と仮定した。アシストスーツの第 2 関節以降の長さを L [m]、重量を W_1 [kg]、人間の腕の重量を W_2 [kg]、リング収穫作業時の腕の上下動の

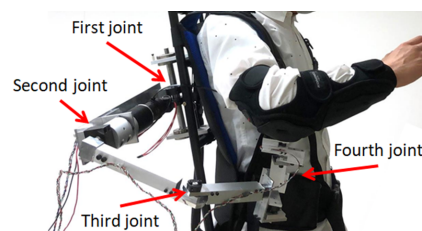


Fig. 1 Power assist suit

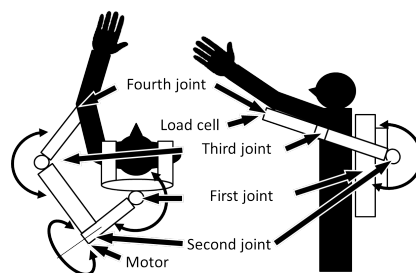


Fig. 2 Diagram of power assist suit

角速度を ω [deg/s]、重力加速度を $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ とすると、必要なトルク τ とパワー P は、

$$\tau = (W_1 + W_2) \times g \times L \quad (1)$$

$$P = \tau \times \omega \quad (2)$$

で求められる。第 3 関節が一直線状となる時にモータに最も負荷がかかるので、 $L = 0.40 \text{ m}$ 、 $W_1 = 1.0 \text{ kg}$ 、 $W_2 = 3.2 \text{ kg}$ 、 $\omega = 90 \text{ deg/s}$ とすると、(1)(2) 式より $\tau = 16.5 \text{ Nm}$ 、 $P = 51.7 \text{ W}$ となる。以上のことから余裕をもって、定格出力 150 W のモータ (RE40-148867, maxon motor) を選定した。

2.3 制御

Fig. 3 に、パワーアシストスーツの制御システムの構成を示す。制御は上肢の重量補償及び装着者の意図による関節角度の調整とした。

上肢の重量補償制御は、装着者の上肢とパワーアシストスーツの第 2 関節以降の機構の重量を補償する制御を行う。トルク指令値 V_τ は第 2 関節の角度に依存するため、モータに搭載されているエンコーダから得られる角度データ θ を用いて計算する。計算されたトルク指令 V_τ は、PC

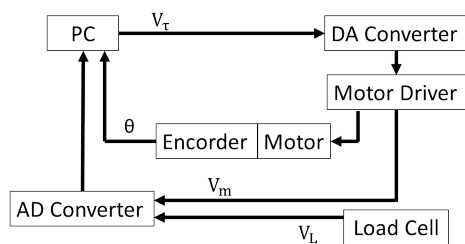


Fig. 3 Control system of power assist suit

から D/A 変換されモータドライバに入力される。モータは、モータドライバによって電流駆動される。モータの発揮トルクを計測するため、モータドライバから出力される電流モニタ出力電圧 V_m を A/D 変換し、PC に入力する。

装着者の動作意図の推定は肘部に搭載されているロードセル(SC133-10kg)の値を用いる。ロードセルの値 V_L は AD コンバータ (HX711)、マイコン (ArduinoUno) を用いて 10 Hz で取得し、シリアル通信で PC に送信される。ロードセルの値が大きくなると振り下げと判断し、発揮トルクを減少させる。小さくなると振り上げと判断し、発揮トルクを増加させる。

モータは電流によるトルク制御とし、PID 制御により目標値追従する。また、装着者の保護のためモータが規定角度以上回転しない構造とした。

3. 実験

開発したパワーアシストスーツが要求仕様を満たしているか確認するため、機構評価実験、

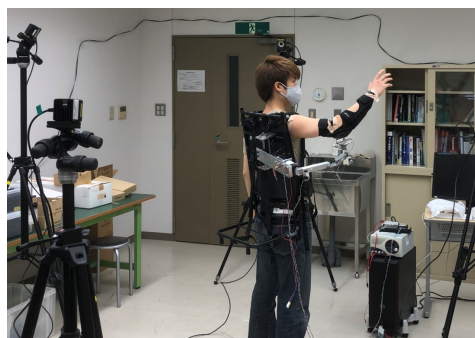


Fig. 4 Experiment setup

機能評価実験を行った。機構評価実験では、パワーアシストスーツの着用前後で装着者の関節可動域に与える影響を評価した。機能評価実験では、筋電位を使用して装着者の身体負荷を評価する。Fig. 4 に実験環境を示す。

実験は、医師から運動制限されていない健康若年者 1 名（年齢 24 歳，身長 176.5 cm，体重 65 kg，男性）を対象に行った。

3.1 機構評価実験

パワーアシストスーツ着用前後で、装着者の関節可動域の変化を評価する。また、パワーアシストスーツ着用時の関節可動域と、弘前市のリンゴ農園で行った収穫作業動作解析実験³⁾から得た関節最大角度を比較することで、収穫作業への影響の有無を評価する。

対象とする運動は、肩関節の屈曲・伸展、外転・内転、外旋・内旋、肘関節の屈曲・伸展の 4 動作とし、それぞれパワーアシストスーツ着用時、非着用時で計測した。運動は、光学式モーションキャプチャシステム (OptiTrack) を用いて計測を行った。各関節角度データは 120 Hz で取得され、csv ファイルに出力される。

3.2 機能評価実験

パワーアシストスーツの着用前後で、肩関節の屈曲にかかわる三角筋前部の表面筋電位を取得し、積分筋電位から身体負荷の評価を行う⁴⁾。

対象とする動作は肩関節の屈曲動作とし、肩関節角度 45°, 90°, 135° の 3 姿勢とした。計測は各姿勢において、2 秒振り上げ、6 秒静止、2 秒振り下げを 1 セットとし、各 5 セット行った。なお、被験者の疲労による影響を考慮し、セット間に 1 分の休憩を行った。

表面筋電位は筋電計 (MYOTRACE400, Noraxon Inc.)、ディスポ電極 (VitrodeF-150M, 日本光電) を用いて計測した。筋電位データは 1000 Hz で取得され、csv ファイルに出力される。

Table 1 関節可動域と作業関節最大角度

動作	肩関節			
	屈曲 [deg]	伸展 [deg]	外転 [deg]	内転 [deg]
free	187.3	-66.7	155.5	-57.1
assist	173.9	-52.2	153.0	-44.2
harvesting	118.5	-42.9	65.1	-41.5

動作	肩関節		肘関節	
	外旋 [deg]	内旋 [deg]	屈曲 [deg]	伸展 [deg]
free	135.5	-150.6	133.1	6.2
assist	134.1	-133.2	119.9	5.3
harvesting	77.6	-88.8	119.3	0.0

4. 結果と考察

機構評価実験の結果を Table 1 に示す。どの動作においてもパワーアシストスーツ着用時には、非着用時と比較して関節可動域が狭まる傾向にある。しかし、パワーアシストスーツ着用時の関節可動域と栽培作業時における関節角度と比較すると、栽培作業時の最大角度はパワーアシストスーツ着用時の関節可動域の中に納まっている。このことから、開発したパワーアシスト装置はリンゴ栽培作業に支障が出ない構造であることが言える。

機能評価実験の結果を Fig. 5 に示す。パワーアシストスーツの装着、非装着時の各姿勢における三角筋前部の積分筋電位を比較した。Fig. 5 より、パワーアシストスーツ装着時には積分筋電位が有意に減少したことから三角筋前部の負担が減少していることがわかる。このことから、パワーアシストスーツの使用により、上腕の身体負担が減少したことが分かる。

以上の結果から、本研究で開発したパワーアシストスーツは要求仕様を満たし、栽培作業に支障が出ない範囲の関節可動域を持ち、身体負担軽減効果があることが認められた。

5. 結言

本研究では、リンゴ栽培作業中の上肢の負担軽減支援を目的とし、直感的な操作、簡単な着

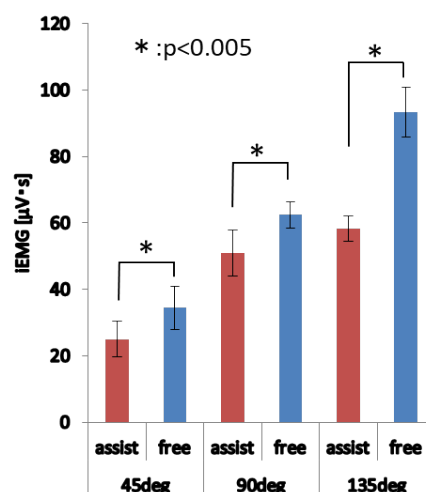


Fig. 5 積分筋電による疲労評価

用、栽培作業の妨げにならない構造・自由度を有する上肢作業支援パワーアシストスーツを開発した。開発したパワーアシストスーツを用いて、実際の栽培作業を想定した実験を行い、有用性の確認を行った。その結果、装着者の体の動きに追従し、リンゴ栽培作業に支障がない関節可動域を有することが示された。また、筋電位計測による身体負担評価では、パワーアシストスーツ装着による身体負担軽減が認められた。

今後は、栽培作業により適した制御方法の提案、関節トルクを用いた身体負担軽減効果の検証、長時間の収穫作業による検証、安全性を考慮した構造の検討を行う。

参考文献

- 1) 農林水産省: 農業労働力に関する統計, <http://www.stat.go.jp/data/nihon/index2.html>
- 2) 遠山茂樹: 農業用パワーアシストスーツの開発, 農業機械学会, 72-2, 109 (2010)
- 3) 田澤卓, 今井理生, 長井力, 佐川貢一: ウェアラブルセンサを用いたリンゴ収穫動作の計測, 計測自動制御学会東北支部第 323 回研究集会, 323-1
- 4) 石垣理子, 猪又美栄子: 筋電図による着脱時の動作適応性評価-重ね着における素材間摩擦を要因として-, 日本家政学会誌, 58-9, 569/577 (2007)
- 5) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム, 11, 23/33 (1992)