

# 重作業向けパワーアシストスーツの開発 — ロボットのパワーと人の器用さの両立 —

## Development of the Powered Exoskeleton for Heavy Work - Coexistence of Robot's Power and People's Dexterity -



村田 直史\*1  
Tadashi Murata

平井 裕久\*2  
Hirohisa Hirai

大西 献\*3  
Ken Onishi

田村 佳宏\*2  
Yoshihiro Tamura

小堀 周平\*2  
Syuhei Kobori

風岡 尚樹\*4  
Naoki Kazaoka

重作業に従事する人員の削減や作業工程の短縮を狙った、重作業向けパワーアシストスーツ (PAS)を開発している。鍵は人の器用さを損なわずに人の力を上回るパワーを制御するための技術である。当社はこれまでに80kg超の重量を保持しつつ3.9km/hの歩行を可能にする下肢の開発に成功した。2016年9月から始まった(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)“ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト”<sup>(1)</sup>にて、実作業に合わせて開発した上肢と結合してその効果を検証するなど実用化に向けて推進している。

### 1. はじめに

パワーアシストスーツとはモータや油圧などのアクチュエータを有する外骨格型の装置であり、人が身に着けることで発生力の強化、あるいはリハビリテーションなど歩行補助としての利用が期待されている。後者はサイバーダイン社のHAL<sup>(2)</sup>やRewalk Robotics社のRewalk<sup>(3)</sup>などが有名であり、既に発売されているものもある。

基本仕様			
アシスト力	PASが持ち上げる力	83Kgf	搬送可能重量40kg+下肢目標重量25kg+上肢目標重量より決定
重量	・フレーム仕様	・39.0 Kg	・総重量87.3ーアシスト力83 =4.3kgは人が負担する
	・遮へいジャケット仕様 (遮へい率0.6)	・87.3kg (遮へい部56.3kg)	
寸法	W: 618mm × D: 399mm × H: 1498.5mm	プラント内など屋内の狭隙部 (エアロック等)を通過可能	
稼働時間	バッテリー使用時	連続2時間	どこでも作業可能 バッテリーのみ交換で2時間以上の連続作業も可能
歩行速度	・フレーム仕様	・4.5 km/h	作業現場までの移動、重量物運搬作業に時間がかからない
	・遮へいジャケット仕様	・3.9 km/h	
装脱着時間	・フレーム仕様	・1分以内	装脱着が非常に簡単で装着者毎の調整が不要
	・遮へいジャケット仕様	・5分程度	

図1 PAS 下肢の性能と機器構成

一方、発生力の強化を活用したものに関しては、重量物を持ち上げる瞬間のみアシストして腰の負担を緩和する製品はあるものの、人の発生しうる力以上の重量物を持ち上げ・保持するまでの機能を備えた製品は国内・海外を通じてほとんどないと言ってよい。その理由は、装置の大型

\*1 ICTソリューション本部システム技術開発部 主席技師      \*2 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部機器設計部  
\*3 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部機器設計部 主幹技師 技術士(機械部門)  
\*4 総合研究所先進デザイングループ

化やアシストする力がかえって人の動きを阻害することなどが技術的難易度を高くしているためである。

当社では発生力の強化による重作業効率の向上効果に着目し、災害時の傷病者搬送や建設、土木、組立工場、バックヤードなどの現場に適用可能な重作業向けパワーアシストスーツ (PAS)を開発してきた。2015年12月には下肢試作機(図1)をロボット展示会に出展するとともにプレスリリースを行った<sup>(4)</sup>。

## 2. 重作業向け PAS の機能要求

### 2.1 アシスト力の設定

重作業現場への PAS 投入による一番のメリットは人員の削減である。法令によると、人が1人で連続して取り扱ってよい重量は 20kg、逆に1人で取り扱ってはいけない重量は 55kg(職場における腰痛予防対策指針:基発第 547 号)である。このことから、作業人員2人を1人に減らすには、搬送可能重量は 60kg(2人で取り扱わなければならない負荷重量) - 20kg(人が1人で負担可能な重量) = 40kg 以上が望ましい。以上の検討の結果、PAS の搬送可能重量仕様を 40kg に定めた。これに、設計時に定めた下肢重量目標 25kg、上肢重量目標 18kgを含めた計 83kgf をアシスト力と定めた。

### 2.2 機能要求

高アシスト力を実現するためのアクチュエータ高出力化が、逆に人の動きを阻害したり安全性の低下を招くといったリスクがある。このリスクを克服するため以下3つの機能要求を定めた。

- 1) 軽量化…アクチュエータの高出力化に伴いフレームやバッテリーが大型化する。これらの重量増加に従い、さらに高出力なアクチュエータを再選定しなければならない。…といった負のスパイラルを避けるため、装置の軽量化が必要である。これには材質の選定はもちろんのこと、冗長な機構を省いて最適化するような設計コンセプトが必要である。
- 2) 安全性…転倒時の人へのダメージを極力少なくする工夫や、電装系故障時の制御の暴走を防ぐためセンサや通信系の2重化が必要である。
- 3) 人との親和性…PAS が重量物を支えるには、そのリンク機構が地面に設置して反力を発生できる状態になければならない。つまり、立脚(地面に着いている側の脚)のみがアシスト力を発しようるのであり、立脚と遊脚の切替えに応じてアシスト力をタイミングよく切り替える制御機能が必要である。

また、高出力化のために減速比が大きくなりバックドライバビリティ(動力を伝達する減速機などの機構において、通常とは逆に出力側から力を加えた場合の入力側の動きやすさ)が損なわれるため、いわば“操り人形”のような状態となる可能性がある。これを解決するため、人の意思を反映して先行動作できるような制御機能が必要である。

## 3. 機能要求達成のための設計

### 3.1 上肢モジュール設計による軽量化

アクチュエータ高出力化に伴う PAS の大型化という負のスパイラルを脱するには、装置を極限まで軽量化しなければならず、機器のスリムアップや材質の見直しだけでは限界がある。

そこで、“一体でなんでもできる PAS”ではなく、上肢を支えるための共通下肢に対して個別の作業用途に特化した上肢を付け替えるというモジュール設計を採用した(図2)。上肢を必要最小限の機能に限定することで機構の冗長化を防ぎ、軽量化を達成できる。上肢の軽量化はそれを支える下肢の出力を減らすことにもつながるので、結果として PAS 全体を軽量化できる。

モジュール設計を実現するには、どのような上肢が結合されても下肢が適正なアシスト力を発生させられるような制御が必要である。そこで、図2のように上下肢の結合部に力センサを配置し、未知の上肢及び搬送物によって体幹周りに発生する転倒モーメントを検知し、それを打ち消すようにトルクを発生させるような制御機能を考案した。

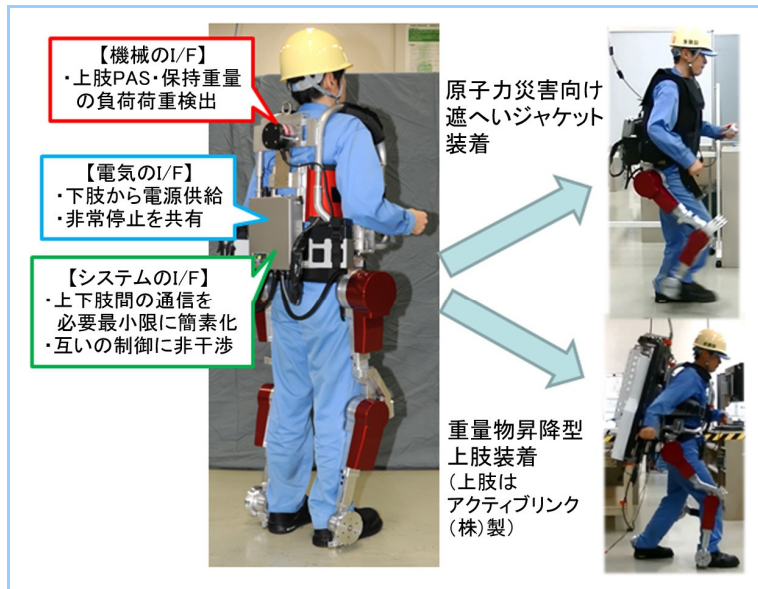


図2 上肢モジュール設計思想

### 3.2 安全設計

安全設計の実現に先駆け、生活支援ロボットの国際安全規格 ISO13482 を参考にしてリスクアセスメントを実施した。なお、2016年に低出力装着型身体アシストロボットを対象にしたJIS規格が制定されている(JIS B 8446-2)。近い将来、PASのような高出力向け規格も制定されることが予想される。

リスクアセスメントの結果を踏まえ、以下の安全設計を実施した。

#### 3.2.1 拘束箇所の最少化

一般的に世に知られているパワースーツの多く(足首までの機構を有するものに限る)はRewalk<sup>③</sup>のように太腿や脛がリンク機構に拘束されている。しかし人の関節機構は複雑であり、パワースーツの単純な機構では人の動きをトレースできないため、かえって人の動きを制限してしまう。また、PASのような重作業向けではリンク機構が人に替わって重量物を支えることと、人につかず離れず付いてきてくれることが実現できればよく、人の脚の動きを厳密にトレースする必要はない。

そこで、拘束箇所を足首と腰及び胸に限定した。こうすることで、万一の転倒時にPASがのしかかることによる身体へのダメージを極力減らすことができる。また、足首の拘束は靴によるもののみとし、緊急時には靴を脱ぐことで即座に脱出できるようにした。

このほか、ISO13482を参考にリンク機構への指などの挟み込みを抑止する本質安全設計も実施した。

#### 3.2.2 CPU 2重化

CPU やレゾルバ故障に起因する暴走などの異常動作を防ぐため、モータを駆動するサーボ基板上のCPUを2重化して以下の監視をできるようにした。

- ①電流値の照合…各CPUが検出するモータからの電流値を照合し異常を検出する。
- ②計算結果の照合…各CPUが出力するモータ指令値をCPLD(Complex Programmable Logic Device:プログラムが可能な論理回路素子。配線接続を組み替えることで実現する)にて照合し異常を検出する。
- ③CPU相互信号の照合(ポーティング)…各CPUが周期的に処理を行っていることを相互の周期信号にて照合する。
- ④レゾルバ値の照合…モータ側、ギヤ側に各々組み付けられている角度検出用のレゾルバ値を照合し、故障検知する。また、制御用としてメインに用いるモータ側レゾルバの故障を検出した場合には、代替としてギヤ側レゾルバ信号を制御信号に切り替えることで延命措



置を図ることができる。

PAS は人が装着しているため、例えば1関節のサーボの異常で即停止にするとバランスを崩し転倒の危険があることから、現状では上位のコントローラに異常状態を伝達するのみとしている。今後は、サーボ単体の異常でアシスト制御全体を自動停止するか、もしくは安全な状態でアシスト制御を任意に手動停止するかなど、安全レベルに準じた停止手段の規定化が必要となる。

### 3.2.3 通信系統2重化

1ms の高速定周期で通信が可能であることと、冗長性を確保できることから Flex Ray 通信を採用した。通信ラインはA, B 2チャンネルを実装しているため、片方が断線したら通信ラインを切り替えることでシステムの瞬時停止を回避することができる。

## 3.3 人との親和性向上のための制御系設計

### 3.3.1 負荷アシスト機能

重量物を PAS で支持して人への負担をなくすためには、重量物の負荷を、人の脚を經由せずにリンク機構を介して地面に伝えなければならない。これを実現するため、人の足裏荷重に着目した。この荷重を上向きにキャンセルする力を目標アシスト力としてリンク機構に発生させることができれば、人は負荷を感じることはない。

この制御コンセプトを実現するための鍵となる“人の足裏荷重センシング”のため、靴のインソールにセンサを埋設した。足裏の柔軟性と正確な荷重値の検出を両立させるべく、試作品を作り最適なセンサ選定や配置を決定した(図3)。

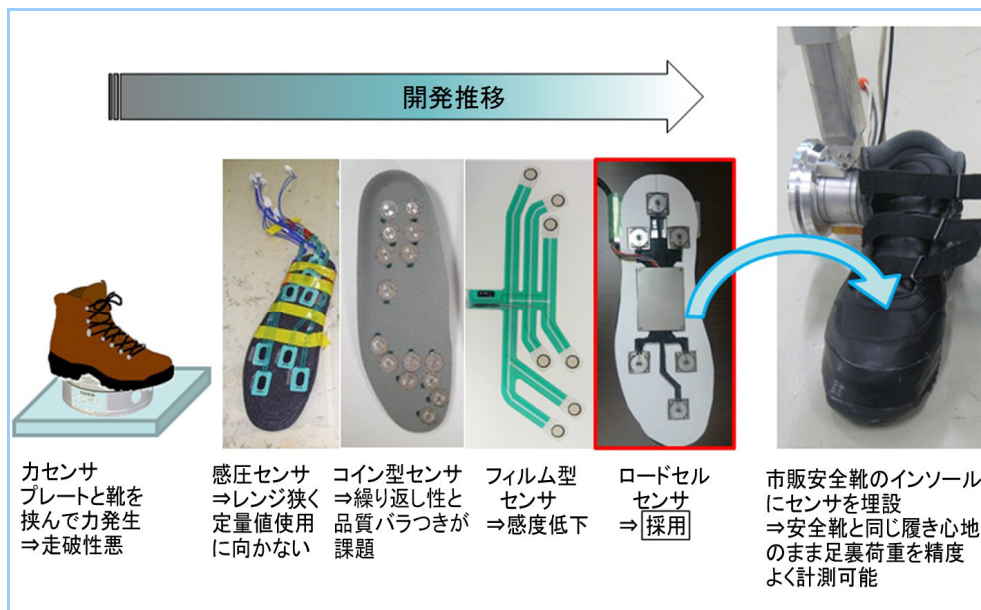


図3 足裏センサ開発の推移

### 3.3.2 状態推定機能

2章で述べたように、アクチュエータの高出力化によるバックドライバビリティの悪化は避けられないため、PAS 非装着時と同レベルの機動性を実現するためには、状態推定アルゴリズムにより人の動作意思を先読みして先行制御するような工夫が必要である。

先行事例では人の筋電を計測することで、実動作として具現化する前の意思情報をくみ取り制御する方法が採用されている。しかし、筋電信号は人の個体差はもちろん、その日の体調や環境によっても変化するため毎回キャリブレーションを必要とするという課題がある。これは、我々がターゲットとしている重作業や災害時の緊急対応といった用途にはそぐわないと考え、筋電センシング手法を採用せずに前述の足裏センサや慣性センサの情報を有効活用することにした。

PAS に実装されている状態推定アルゴリズムのうち2つを簡単に紹介する。

- ・ 脚上げ降ろしアシスト機能…足裏荷重の時間変化から脚の上げ下ろしを推定し、それをアシストするようアクチュエータ指令を生成する。脚の上げ下ろしは遊脚と立脚という重要な状態遷移なので、これを正しく推定するこの機能は非常に有効である。
- ・ 歩行アシスト機能…慣性センサにより歩行中の脚の運びの情報を蓄積し、学習することで次の歩行軌道を生成する。PAS 非装着時と同等の歩行速度を達成する上で、この機能は必須である。

PAS が位置や速度に対してフィードバックするような制御系となっていると、人がその姿勢に拘束されてしまい思うように動けなくなるため非常に親和性が悪く機動性が低下する。このようなことのないよう、アルゴリズムは全てトルク制御で構成した。制御ブロックの概要を図4に示す。

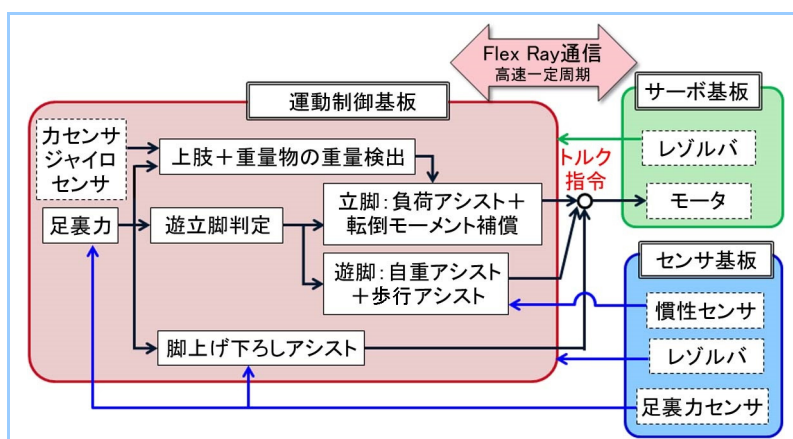


図4 制御ブロック図

## 4. 機能確認試験結果

本稿では①歩行試験、②偏荷重を有した上肢を支持できることを確認するための偏荷重支持試験、③跨ぎ及び階段昇降試験について示す。

### 4.1 歩行試験

遮へいジャケットを装着した際の歩行の様子をコマ送りにしたものを図5に示す。遮へいジャケットとは、原子力発電所事故対応への PAS の適用を想定したものであり、上半身から腰下部までを 9mm の鉛板で鎧のように覆って人員の被ばくを最小限にとどめることができる。しかしその総重量は上下肢を含め 87.3kg と重く、PAS の補助なしでは動くことすらままならない。



図5 遮へいジャケット(右)と歩行試験の様子

図5のように歩行中の PAS 装着者の頭位置が下がっていないことから、PAS のアシストにより遮へいジャケットの重量を保持できていることが確認できた。なお、歩行速度は遮へいジャケット非装着時と同等の 3.9km/h を達成した。今後、機械系の最適設計によりスリムアップされれば、さらに早くスムーズな歩行が可能になることが見込まれる。なお、この試験は日本原子力発電(株)との共同研究の一環で実施した。

## 4.2 偏荷重支持試験

上肢重量に見立てた 35kg の錘(ダンベルウェイト)をフレームに取り付けて姿勢安定性を検証した。試験状況を図6に示す。制御開始前は足裏の床反力作用点からモータの回転軸中心が離れているために転倒モーメントが大きく、人の力だけでは姿勢を直立に維持できない。これに対し制御開始後は 3.1 節で記した転倒モーメント補償制御機能により直立姿勢を容易に保つことができた。このことは、上肢設計における重心バランスの制約が緩和されるため、機能優先の設計ができることを示している。

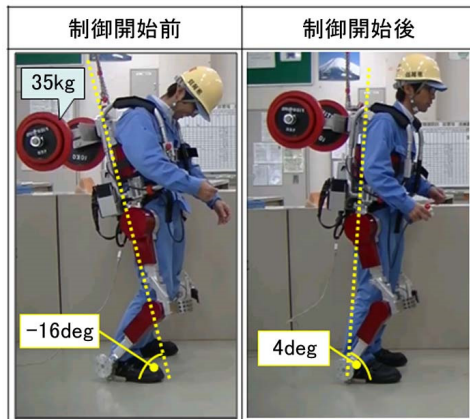


図6 偏荷重支持試験

制御により 35kg の錘を載せた状態でも上半身が楽な姿勢になるとともに、脚が伸びて直立姿勢を維持できるようになる。

## 4.3 跨ぎ及び階段昇降試験

PAS を重作業用途に適用するためには平地歩行の機能だけでは不十分であり、しゃがみ動作、前屈動作、跨ぎ動作、階段昇降動作等を装着者の意図する通り実現できなければならない。ここでは跨ぎ動作と階段昇降の試験状況を図7に示す。3.2.1 節で述べたように太腿や膝を拘束していないため、人は制限を受けずにこれらの動作が可能であることを確認できた。ただし、PAS が手すりに接触しないようにさらなるスリムアップが必要であることや、降り動作の安定性向上が課題として残っている。特に後者は、状態推定機能を状態遷移の推定にまで拡張する、例えば階段下り状態であることを認識し、それに相応した指令を生成するような制御アルゴリズムの高度化が必要になると考えている。

なお、これら動作の機能検証試験には福井県エネルギー研究開発拠点化推進事業の一環で、福井大学の川井准教授と高橋准教授のご助力を仰いで実施した。



図7 跨ぎ試験(左), 階段昇降試験(右)

## 5. まとめ

当社の重作業向けパワーアシストスーツ(PAS)はこれまでに下肢の試作を終えており、歩行や跨ぎ動作など人の器用な動作と、80kg超の重量保持能力など人の力を上回るパワーの両立を実現することができた。この成果は2015年12月のロボット展示会や2016年7月のインフラ検査・維持管理展にて一般公開した。試作機は未だ十分に洗練されておらず改良の余地を残しているものの、その反響は大きく、訪れた方々がPASに期待を寄せてくださっていることを実感した。

パワースーツという名称は1959年に小説で初登場して以来、世に広く認知されているが、60年以上経過した現在に至っても製品として十分に実現されているとは言い難い。その理由の一つとして、企業や研究機関の連携不足が挙げられる。当社PASは上肢をモジュール化し、簡単なインターフェースで下肢を結合するコンセプトを採用した。これを活用して他機関との連携を強化し、早期製品化を実現すべく推進中である。

図8にPASの将来像を示す。4年後の東京オリンピックには、競技観戦に熱中するあまり倒れてしまった観客を颯爽と介護搬送するようなPASの姿を期待してほしい。

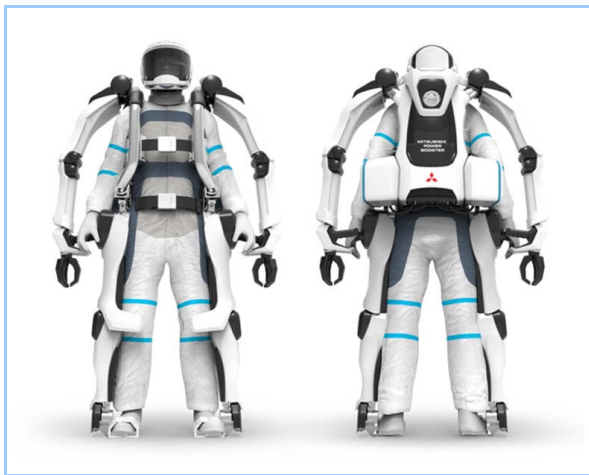


図8 PASの将来像  
クリーンかつ先進性を想起させるデザイン

## 参考文献

- (1) ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト, (2016)  
<http://www.nedo.go.jp/content/100783669.pdf>
- (2) <http://www.cyberdyne.jp/products/HAL>
- (3) <http://rewalk.com>
- (4) Press Information 原子力災害対応のパワーアシストスーツ(PAS)を開発 日本原子力発電株式会社と共同で, (2015)  
<http://www.mhi.co.jp/news/story/1512015706.html>