

ロボットスーツ HAL[®]

—建設現場への適用—

株式会社大林組 技術研究所 部長 うえだ 上田 ひさてる 尚輝
 CYBERDYNE株式会社 研究員／博士（工学） はら 原 ひろまさ 大雅

1. はじめに

建設業界においては少子高齢化による熟練技術者の不足や、苦渋作業や単純作業を敬遠することによる建設技能労働者の確保がますます困難になると予想されている。この問題に対応するための施策として、当社では「新技術の活用（ロボット化）、IoTの活用、新たな省力化技術の活用」、「新規入職者の確保（教育訓練校）」、「女性のさらなる活躍の推進（なでしこ工事チーム）」、「技能労働者の処遇改善（スーパー職長）」などさまざまな取り組みを行ってきたが、その一環として装着型ロボットであるロボットスーツ HAL[®]腰タイプ作業支援用（CYBERDYNE社製）を試験的に現場に導入して、その有効性について検証を行ってきた。

建設技能労働者のうち7割が何らか腰に不具合を持っているといわれており、腰の負荷低減を図ることは、労働者確保の有効な手段となる。ロボットスーツを着用することで、高齢者が継続して現場に従事できる、苦渋作業を低減することで新規入職者の確保に寄与するなど期待している。

ここでは、重量物運搬作業のために当初設計されていた HAL を建設現場での重量物運搬以外の複数作業に対応できるよう、分析・評価・改良を

するために実証試験を進めてきた経緯、改良された HAL の性能について報告する。現場実証試験結果より建設作業の分析を行い、作業に応じて課題を抽出し解決策を実施し、幅広い作業に適用できるようになった。

2. HAL の選定理由

作業員の疲労低減の目的で、さまざまなタイプの装着型ロボットが提案されている。そのうち HAL は、動力を用いて作業を支援するタイプのもので、重量物を持ったときに腰部にかかる負荷を低減することで、腰痛のリスクを減少させ疲労低減を図るものである。

他の装着型ロボットと比較して、HAL は次のような特徴があり、建設現場の作業に適していると考えて、実証試験を進めることとした。

- ① HAL を操作する必要がなく、装着者の意思で作動させることができる。
 - ・腰を動かそうとしたときに、皮膚表面に発生する生体電位信号を読み取り HAL が制御され、必要なタイミングでアシスト力が得られる。よって、習熟すると HAL の操作を意識せず、集中して作業に取り組める。
 - ・将来、腰だけでなく手足などの他の部位も同時にアシストする場合でも、複雑な操作は必

要がなく任意に作動させることができるため、拡張性に期待できる。

- ② 比較的小型軽量で、建設現場の狭い場所でも使用可能である（写真－1）。また、交換式バッテリーで駆動し、外部からの動力源を必要としないため、現場内を任意に移動できる。

3. HAL の概要

(1) 動作原理

図－1 に HAL の動作原理を示す。これは全身タイプの HAL の概念図であり、手足をサポートしている状況を示している。今回の実証試験では、腰を支援する HAL を使用したが、原理は同じで腰部の生体電位信号を検出して作業支援を行う。

HAL は Hybrid Assistive Limb の略称であるが、Hybrid は2つの要素の組み合わせという意味で、「生体電位信号より検出したアシストのタイミングと大きさ」と、「あらかじめプログラムされた動作パターン」を組み合わせ、動作支援を行っている。

また、操作する必要がないことを特徴としてあげたが、動こうとした意思で HAL が作動することは装着者には初めての体験であるため、個人差があるが習熟に時間が必要となる場合がある。

(2) 主要仕様

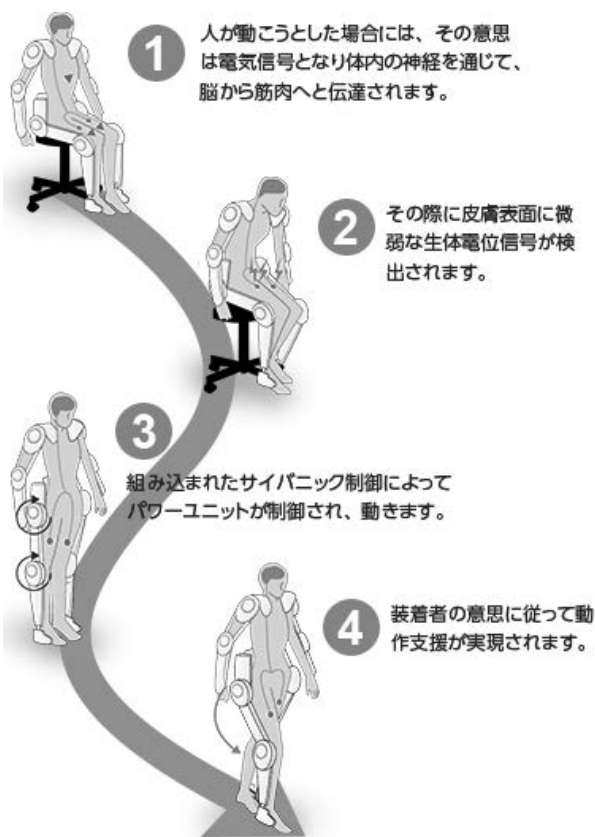
次に最新バージョン（2018年3月現在）の HAL の主な仕様を示す（表－1）。本バージョンより、防塵防水性能が追加された。

本体背面にバッテリーが取り付けられており、予備のバッテリーを充電しておき、ワンタッチで交換が可能である。また、本体左右にアクチュエータが配置されており、ベルトを介して上半身を持ち抱えるような作業支援を行う。



Prof. Sankai, University of Tsukuba / CYBERDYNE Inc.

写真－1 HAL 本体



Prof. Sankai, University of Tsukuba / CYBERDYNE Inc.

図－1 HAL 動作原理

表－1 主要仕様	
外形寸法	D 292 × W 450 × H 522 mm
重量	3.0 kg (バッテリー含む)
可動範囲	股関節：伸展 30° 屈曲 130°
駆動時間	3 時間 (使用状況による)
動作環境	温度：0～40℃ 湿度：20～80%
防水性能	IEC 防水保護等級 4 級 (IPX4)
防塵性能	IEC 防塵保護等級 5 級 (IP5X)

4. 工場内事前試験

2014年10月よりHAL腰タイプ作業支援用5台を導入し、工場内事前試験を経て、同年11月より現場実証試験を開始した。現場導入前の工場内事前試験では、HALの基本性能の確認、現場で必要と考えられる管理手法等についての検討・確認を実施した。7名の被験者で実施したが、できるだけ幅広い年齢層、体格の違う作業員を選定した。また、そのうち3名は腰が疲れやすい、重量物を持ち上げたとき痛みを感じるなどの不具合を感じていた被験者である。

(1) 必要な習熟期間

個人差にもよるが、一日当たり2時間程度の装着作業を続ければ、2、3日で、持ち上げるときのタイミングで作動させることができた。

また、電極を腰部に貼り付けることなど、装着、脱着に必要な時間については習熟度が上がるにつれて、半分以下となった。

(2) 装着可能な体格の範囲、年齢による制限の確認

事前試験の被験者では、全員装着して適正に作動することができた。後に実施した現場実証試験において、腰の幅が広すぎて装着できない作業員の例もあったが、大半の作業員が装着可能であると思われる。また、60歳以上の作業員は2名いたが、特に不具合は確認されなかった。

(3) 作業員への影響の確認

繰り返し外部よりアシスト力を受けるが、その時のタイミングのずれ、予想外の力がかかるなどで、作業員への不具合等を生じないか確認した。試験後、腰痛など体に異常、痛み等を生じることはなかった。

(4) 重量物運搬試験結果

連続して重量物運搬作業に適用することで、作業効率への影響、負担低減の度合いなどを確認した。大半の作業員で、有意な有効性が確認されたが、特に腰に不具合を感じている作業員では40%程度の作業効率が向上した。

作業内容：分電盤運搬 1クール＝約20kgの分

電盤を80面5m移動×3回/被験者

職種：機械工、電気工（工場内で工事機械の整備が中心）

年齢：24～65歳、平均44歳

身長：165～185cm、平均172cm

体重：62～85kg、平均72kg

5. 現場実証試験（工場内模擬試験）

工場内事前試験結果より、HALを安全に実工事で使用できると判断して、現場実証試験を開始した。

表-2に実証試験サイトを示すが、腰への負荷が大きいと予想される作業に適用した。これらの現場で連続して試験をしたのではなく、現場での試験結果から課題、改良点を抽出して、次の現場での試験でさらに詳細な検討を行うステップを繰り返す手法をとった。

一部の作業を対象に行った工場内模擬試験は、作業効率に与える影響を評価するための実験（分電盤の運搬）、中腰姿勢での作業（鉄筋結束、床仕上げ）での動きを詳細に分析するために実施した。

表-2 現場実証試験サイト

検証サイト	検証作業
大林組 東京機械工場	分電盤運搬、床鉄筋組立、床押え
江東区 土質調査現場	土質サンプル運搬
荒川区 鉄筋加工場	鉄筋加工
中央区 ビル建設現場	左官工事
都内 ビル建設現場(3)	OAフロア敷込
京都市 耐震補強工事	3Q-Wall（ブロック積み）

(1) 作業分析

評価の手法としては、アンケート、ヒアリングやビデオ撮影による作業解析が中心であるが、仕事量、作業環境を考慮して分析を行った。

初期のHALは、重量物運搬作業には有効であると確認されたが、建設現場で終日重量物を運搬している作業は少ないため、効率的に現場で使用することは困難であると考えられた。例えば、OAフロア作業においても、実際に重量物を運搬している作業時間は1/3以下であり、その他の時間は、中腰姿勢やしゃがみ込んで作業を行っている。

また、防塵防水性能を有していなかったため、屋外作業が多い土木現場での適用が困難であった。

(2) 課題の抽出

現場実証試験結果より、建設現場で腰への負荷が大きい作業に、HALを効率より活用するために次のような課題が抽出された。

- ① 中腰姿勢での作業支援を含む、複数の作業姿勢への対応
- ② 腹部への圧迫感の緩和、本体や足ベルトとの干渉による不快感の緩和
- ③ 電極（貼付タイプ）の信頼性向上、取付手間の削減
- ④ 防塵防水タイプの製品化

6. 複数の作業姿勢への対応

(1) 対象となる作業姿勢

作業分析の結果、次の3つの作業姿勢での動作を支援することができれば、建設現場での腰部作業負荷を大幅に低減できると判断した（写真-2～5）。

- ① 重量物運搬作業で、持ち上げ下げする作業
瞬間的に大きい負荷が腰にかかる。一定の周期で繰り返して作業するが多い。
- ② 重量物は持たないが、中腰姿勢を保持して下向きに作業する姿勢
床鉄筋の結束作業や床仕上げなど、重量物は持

たないが継続して中腰姿勢を維持する作業の場合、傾いた上半身の荷重を保持するための腰部負荷が大きい。

- ③ しゃがみ込んだまま作業を行い、立ち上がる動作

しゃがみ込んでいる間は、HALによる支援は不要であるが、立ち上がる時の作業支援は有効である。



写真-2 OAフロアでの重量物持ち上げ



写真-3 OAフロアでのしゃがみ込み作業



写真-4 重量物運搬



写真-5 床鉄筋結束

(2) 複数の作業姿勢支援へのアプローチ

HALは「生体電位信号」と「あらかじめプログラムされた動作パターン」を組み合わせ、動作支援を行っている（図-1）。それぞれの動作支援パターンは違うため、正確にどの作業を行っているか推定する必要がある。今回対象とした複数の作業姿勢への適した支援内容は大きく違うため、次のサイクルを回すことで、動作を推定するプログラムの信頼性の向上を図り、また、各支援プログラムの有効性を高めていった。

① 作業でどのような動きをしているかを解析
(HAL 本体の各種センサー, 連続作業時間,
歩行の有無, ビデオ映像などより要素を解析)



② 作業ごとの支援プログラムを作成, 改良



③ 室内試験, 現場実証試験に適用して, 作業
支援データ収集, 分析より定量的な評価,
ヒアリングなどによる評価

(3) 試験結果と評価

① 作業姿勢の推測

3つの作業姿勢の他に, 歩行中である状況を加えて, 4つの状況を推測することが可能となった。

他の装着型ロボットでは, 複数の作業姿勢に適した支援をスイッチで選択するタイプもあるが, その度に操作のため作業を一時的に中断するなど, 煩雑で実用化できるレベルではない。

今回の実証試験で, HAL では自動的に作業姿勢を推測できるため, 実用化のレベルに達したと考えている。

② 重量物の運搬

従来の HAL のシステムと同等の作業支援を行えることが, 確認された。

③ 中腰姿勢の支援

中腰の保持だけでなく, 上半身を起こすときにも有効に支援することができ, そのため, 30～

40% の負荷低減を図ることができた。

連続作業可能時間も長くなったため, 作業効率の改善も期待できる。

④ シャガみ込んだままの作業

シャガみ込んでいる状態では, HAL は作動せず自由に作業を行うことができ, 立ち上がるときに支援を行うことが可能となった。定性的に, 有効性が確認された。

7. おわりに

実証試験結果より課題を抽出したが, CYBERDYNE 社と協力し, 課題解決に向けて取り組んできた。いずれの課題も建設現場の幅広い作業で使用するためには, 解決しなければいけないものであった。

中腰姿勢の支援, 腹部への圧迫感の緩和や本体との干渉による不快感の緩和などに取り組んできたが, 当初の目標を達成することができた。また, 防塵防水タイプの HAL も販売が開始され屋外での使用も可能となり, 今後トンネル内などの厳しい環境下でも適用できると考えている。

特に中腰姿勢等複数の作業姿勢を支援できる HAL を開発するための実証試験に多くの労力, 時間を費やしたが, それにより当初から有効性が確認された重量物運搬作業だけでなく, 今後は幅広い作業に適用できると考えられる。