

# xLimb : 収納性と伸縮性を考慮したウェアラブルロボットアーム

丁沢宇† 吉田匠吾† 中村浩太† 鳥居拓馬† 謝浩然†

**概要:** 近年、身体能力の拡張を目的に、両手を使わず作業が可能なウェアラブルロボットアームの研究が進んでいる。しかし従来のデバイスは、作業を行っていない時でもアームが常に伸びている状態になっているため、腕にかかる負担が大きく、ほかの作業を行う際に支障をきたすという課題がある。そこで本研究では、腕にかかる負担を最小限にして、アームを用いた快適な作業を可能にするためのロボットアーム xLimb を提案する。収納性と伸縮性を備えることで、長時間の使用でも快適に、かつアームを使用しない時でも省スペースでの作業が可能になる。さらに、本稿では、使用者の実体験に基づき評価実験を行い、本提案デバイスの有効性について考察した。

## 1. はじめに

近年、人間拡張に関する研究が盛んに行われており、その中でもウェアラブルロボットアームは身体能力の拡張の典型的な例の1つとして挙げられる。しかし、既存のウェアラブルロボットアームは、伸縮性を備えていても収納性は備えていない。そのため、デバイスの不使用時であっても常にアームが展開している状態になっており、省スペースでの使用は難しい。また、デバイスの重心が使用者の体から離れているため、使用者およびデバイスの支点となるモーターへの負担が大きいという問題点もある。

本研究は、提案デバイスの設計のヒントとして自然の中に存在する生物に触発され、収納性と伸縮性を兼ね備えた機構に着目した。例えば、リザメが捕食行動をする際に、顎を前方へ突出させ獲物を捕獲する。テントウムシは、飛行時以外は柔らかい後ろ羽を折り畳み、硬いさや羽の中に収納することで、羽を使用しない時でも邪魔にならないよう脆弱な羽を保護している。この仕組みを利用することで、羽を折り畳んでも嵩張らず、その場の活動に最適な形態を選択して活動することができる[1]。

そこで本研究では、コンパクト化に工夫を凝らし、長時間の使用に支障をきたすことのないよう、日常生活のサポートを目的とする伸縮性と収納性を兼ね備えた装着型ロボットアーム xLimb (図1) を提案する。収納機構及び伸縮機構を本デバイスに適用することで、使用時の快適性が向上すると考えられる。例えば、提案デバイスで物を掴み、自身の方向へ引き寄せることで、腕にかかる負担が軽減される。また、デバイス不使用の際に収納することで、負担が軽減されるだけでなく使用者自身や他人の行動に対し邪魔になることもない。

以上を踏まえ、本稿では実際に提案デバイスのプロトタイプを試作し、評価実験の結果を報告する。

## 2. 関連研究

人間拡張の研究分野にて、尻尾[2]や第三の腕のような、人間が持たない他の生物の器官をロボット技術で模倣し、それを人間の体に装着する研究が挙げられる。ロボット技術



図1 提案デバイス xLimb

を応用した人間拡張には、組み立て作業の支援[3]や、飛行ロボットを用いて身体を拡張できるものなどがある[4]。

一方、人間の重要な器官である手と腕身の能力を拡張すべく、装着型ロボットアームについての研究も進んでいる。例えば、仕組みの最適化をして軽量化したロボットアーム[5]や、簡単な作業を支援する双腕ロボットアーム[6]および外骨格のように腕を支えるロボット[7]なども挙げられる。これらの研究はいずれも両手が塞がって使えない場合や、直接自身の手で触れずに作業を行いたい場面を支援する機能が備えている。

本研究では、上腕に装着するロボットアームをベースにして、収納機構および伸縮機構を導入し、日常作業に使用する際の利便性を高めることができるロボットアームの開発を目指す。

## 3. 提案デバイス xLimb

### 3.1 構成

本提案デバイスは、ベース、ロボット胴体、伸縮機構、グripper、コントローラで構成されている3自由度ロボットアームである。回転・伸縮・開閉という三つの動作が実現できる。提案デバイスの仕組みを図2に、伸縮機構を図3に示す。伸縮機構(歯車ペア含む)の材料はPLAプラスチックで、回転軸の部分ではステンレス製のベアリングと軸を使用している。

† 北陸先端科学技術大学院大学

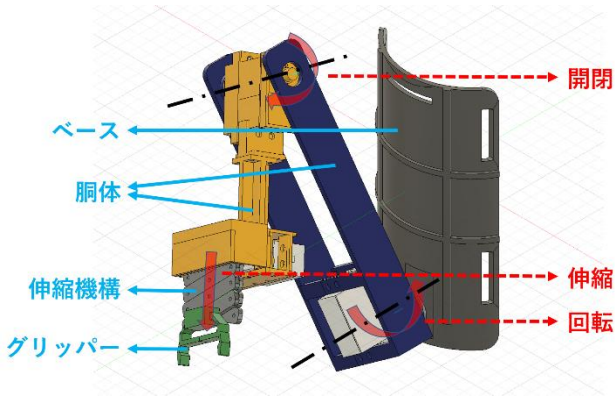


図 2 xLimb の構成 (青) と自由度 (赤)

表 1 サーボモーターの規格と比較

規格	LDX-335MG	LD-3015MG	DS3235
重さ	60g	60g	60g
寸法(mm)	40×20×40.5	40×20×40.5	40×20×40.5
動作電圧	6-7.4V	6-7.4V	5-7.4V
トルク	15kg・cm 6V 17kg・cm 7.4V	15kg・cm 6V 17kg・cm 7.4V	29kg・cm 5V 35kg・cm 7.4V
速度	0.16sec/60°7.4V	0.16sec/60°7.4V	0.11sec/60°7.4V
可動範囲	180°	270°	270°

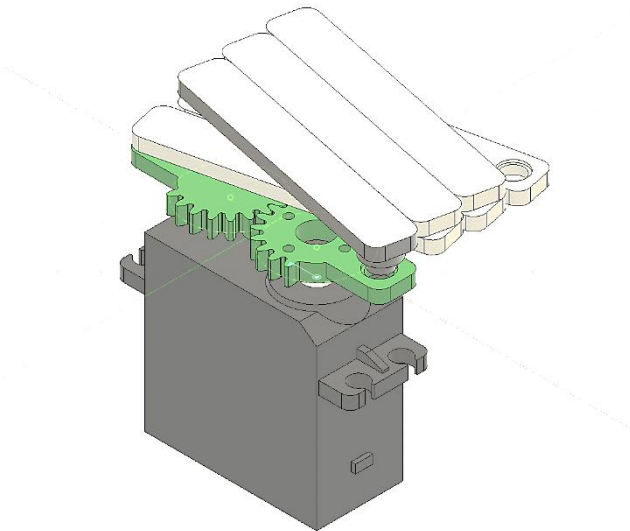


図 3 伸縮機構の 3D モデル

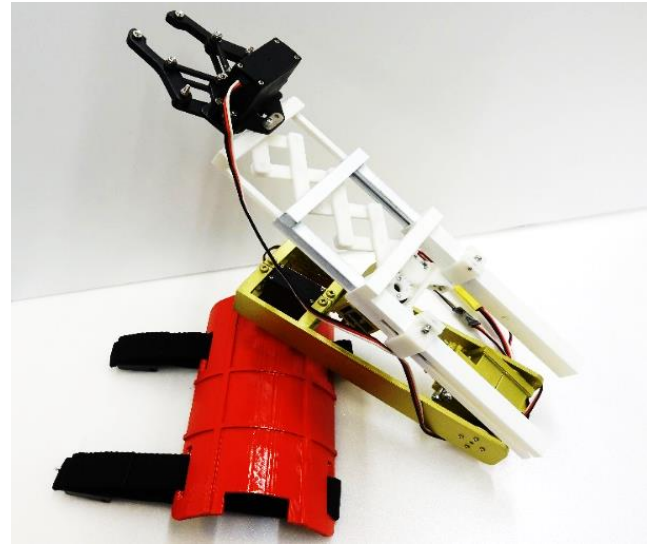


図 4 提案デバイスのプロトタイプ

提案デバイスでは、2つの歯車の回転軸間の距離に制限があり、片側の歯車だけを駆動させることで、伸縮機構の伸展と回収を制御することができる。

### 3.2 プロトタイプ開発

図 4 に開発した提案デバイスのプロトタイプを示す。提案デバイスの寸法は 235×72×60 mm である (各パーツが収納されている状態およびベースを除いた部分)。展開後の最大の長さは約 550 mm (根幹部より先端まで) であり、成人男性の肘から指先までの距離に相当する。コントローラ及びケーブルを除いた重量は 678g である。使用する際に、上腕に装着し、ベルトで固定する。実際に装着する様子を図 5 に示す。

提案デバイスに三種類のサーボモーター (LD-20MG・LD-3015MG・DS3235) が使われており、それぞれグリッパー・胴体 (伸縮と展開の二箇所)・根幹部 (回転) に取り付けている。プロトタイプに利用されたサーボモーターの規格の詳細は表 1 に示す。

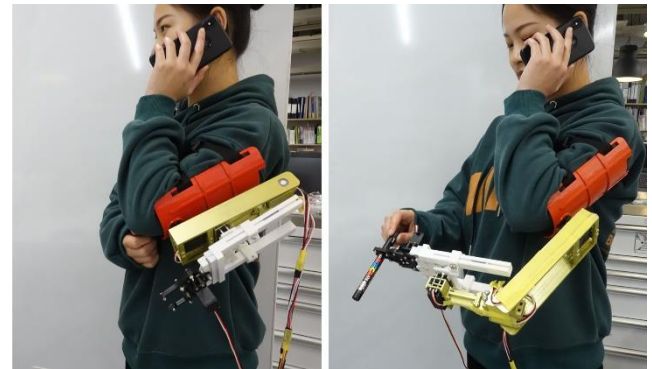


図 5 提案デバイスの装着様子

提案デバイスのグリッパーは、Lobot 社が開発したオープンソースのロボットアーム LeArm のグリッパーを使用した。グリッパーの本体は金属製品で、駆動源となるモーターを含め、合わせて 116g である。グリッパーが全開の場合は最大 57mm の幅および最大 500g の重量の対象物を掴むことができる。

提案デバイスのプロトタイプ開発の際に、伸縮機構に関していくつかの問題点に気づくことができた。提案した仕組みでは、伸展していくと同時に伸縮機構が大きikutawami,

折れる可能性があることがわかった。このたわみによる変形を抑制するために、伸縮機構の外側にサポーター（図5）を付け加えた結果、強度が顕著に増加した。また、サポーターは引き出しの仕組みを参考しているため、伸縮機構とともに動作することが可能である。

本デバイスの3DモデルはAutodesk Fusion 360を用いて製作し、パーツはすべてPrusa I3 MK3S ベアフルキット3Dプリンターを使用し造形した。フィラメント材料はPLAを利用し、プリントに要した時間は約24時間である。

#### 4. 評価実験

提案デバイス xLimb の伸縮性・収納性・利便性を検証するために、評価実験を行った。2種類の実験を行い、それぞれ装着体験およびアンケート調査を行う。装着体験では、被験者に本デバイスを着用した状態で作業を行ってもらい。アンケート調査は体験前と体験後に行う。それぞれの詳細は次の段落で述べる。

装着体験では、本デバイスの特徴を感じさせるために、三つの利用シナリオを用意した。

- 1) 両手で大型の荷物を持ちながら、ロボットアームでメモやスマホを運ぶ。（図6）
  - 2) ロボットアームを展開または収納した状態で狭い場所を通り抜ける。（図6）
  - 3) 自由にロボットアームをコントロールする。（図7）
- シナリオ1では、マルチタスクを同時に実行することを通して、装着型ロボットアームの利用体験を確認する。シナリオ2では、展開した状態と収納した状態で別々の作業を行う比較実験を実施する。シナリオ3では、被験者自身の判断で本デバイスを操作し、可動範囲と機能について確かめてもらう。

アンケート調査は装着体験の前後で実施する。体験前のアンケート調査は、被験者に本デバイスを見せる前に行う。調査の目的は、被験者にとって理想的な装着型ロボットアームを報告してもらうことである。調査の項目は以下のとおりである。

- 考えられる利用場面
- 重視する特徴
- 身体に装着したい部位
- デバイスの理想的な長さ

体験前アンケート調査の結果を分析することで、理想的な装着型ロボットアーム開発の方向性を検討することができる。体験後のアンケート調査の目的は、提案デバイスを被験者に体験してもらったうえで、伸縮性・収納性・利便性についての実感を評価することである。各設問には5段階評価を用いた（5：とてもそう思う～1：全くそう思わない）。



図6 マルチタスク実施の様子(シナリオ1・2)



図7 自由操作の様子(シナリオ3)

#### 5. 結果と考察

##### 5.1 実験参加者

実験には、大学に在籍する学生計14名（男子7名、女子7名）が参加した。被験者の年齢は、20-25歳9名、26-30歳4名、30-35歳1名だった。

##### 5.2 体験前アンケート

体験前のアンケート調査結果の要約を以下に示す。

- 「肉体労働に使用して強くなりたい」および「触りたくないものに対し手の代わりに使いたい」という利用場面が最も多く考えられる。
- 伸縮性より、収納性をもっとも重要視されている。

- ほとんどの被験者がロボットアームの利便性と操作性を重要視している。
- 理想的な装着部位として前腕を選択する人の割合は6割である。
- 大多数の被験者にとって理想的な装着型ロボットアームの長さは、基準となる長さの1-1.5倍である(被験者の肘からグリッパーまでの距離を基準となる長さとした)。

被験者が回答を行う際に、質問事項に関連した物として考えることが少なく、1つの個別の質問として捉える傾向がみられ、選ばれた選択肢に矛盾が生じる場合があった。例えば、前腕を理想的な装着部位と選ぶ被験者が一番多かったが、肉体労働での使用を想定した場合、ほかの部位に装着するよりも肘および肩にかかる負担が大きいと考えられる。つまり前腕にロボットアームを装着することは、肉体労働での使用に適切であるとは言えない。こういう状況を踏まえて、設計者の立場からアンケートの調査結果を見直す必要がある。

被験者の意見を整理し、理想的な装着型ロボットアームの全体像を以下のようにまとめる。

- やや重いものでも持ち上げられる。
- 展開後の長さは肘から指先までの距離の1-1.5倍。
- 装着する際は快適であり、収納機能があるデバイス。

また、本グループが開発したデバイスと、調査結果から得られた理想的な装着型ロボットアームを比較してみると、伸縮機構の伸縮比よりも、デバイスの強度が求められることが明らかになった。

### 5.3 体験後アンケート

体験後のアンケート調査の結果をまとめ、図8に体験後のアンケートデータを箱ひげ図で可視化した。

アンケート結果から、本デバイスの伸縮性および収納性の評価項目に対する平均得点がそれぞれ4.14, 3.86, 3.86, 3.71であることが確認できた。また、展開時に比べ、収納時の不便さが21.3%低下した。快適性の平均得点は3.21であり、我々の予想よりも高くない結果となった。考察として、被験者の5割が女性であり、本提案デバイスが少し重いというフィードバックもあったことから、これが快適性の得点が低下する1つの原因と考えられる。本デバイスの評価を全体的にみると、被験者からのポジティブな回答が多くみられ、開発する前に立てた目標を達成したと言える。

### 5.4 フィードバック

アンケートの自由記述にて回答された被験者のフィードバックに応じて、本デバイスの今後の開発方針を立てる。以下、3つの改善点を具体的に述べる。

(1) 伸縮機構の強度を向上させる必要がある。本デバイスが用いている伸縮機構の伸縮比は高いが、同じ材料を使用する他の種類の伸縮機構に比べ、強度が劣っている。その解決策として、強度が十分求められる部品を金属製品に

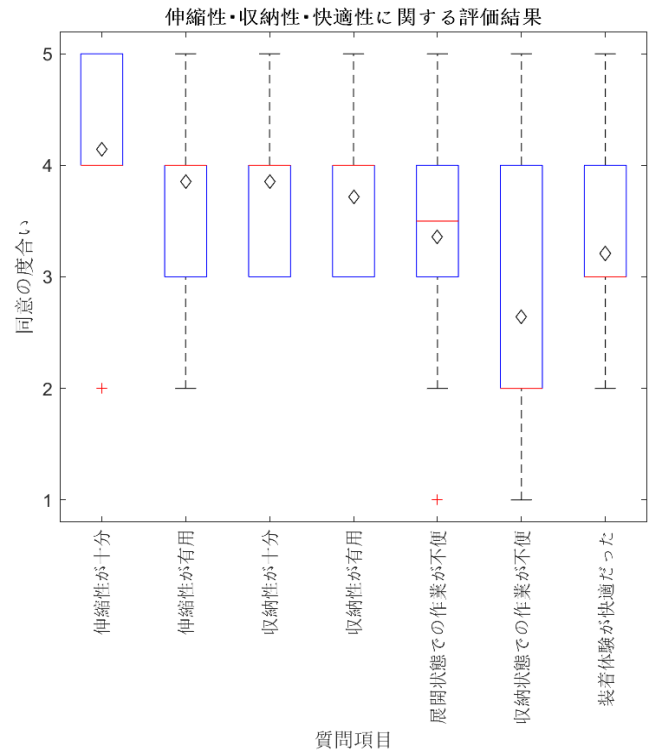


図8 評価実験のアンケートの結果

変更する、などの一部の材料変更が挙げられる。ただし、全体的な重量が増加しないよう、仕組みの簡素化も必要である。また、伸縮比を高くする代わりに強度が高い他種類の伸縮機構を使用する方法も考えられる。当初、本デバイスを提案時は可動範囲を出来るだけ拡張するために、伸縮比の高いマジックハンドのような機構を使用した。しかし、機構の伸展に伴い本デバイスの根幹部に設置されているモーターおよび使用者の腕にかかる負担も増加する。ほかにも、アンケート調査の結果により、ロボットアームの長さは基準の長さ(肘からグリッパーまでの距離)の1-1.5倍が理想的な長さだと判明した。この長さよりも短い長さであれば、伸縮比の低い機構を使用してもコンパクトな体積を維持することが可能だと考えられる。

(2) 装着する際の快適性も指摘された。肘の上部に圧力を感じると報告されており、その解決案を以下のように考えた。(a) ベースにクッションをつけて、圧力を分散させる; (b) ハーネスを利用し、装着の際に上腕にかかる負担を一部胴体に分散させ、快適性を上げる。

(3) 操作しやすいコントローラを設計すべきである。本研究では、デバイスの操作性を研究対象としないため、被験者にボタン式のコントローラを提供しており、そのコントローラでロボットアームを操作している。本提案デバイスを体験する際の、操作のしにくさがネガティブな印象を与えていると考える。次の実験において、WIFI モジュールなどを利用し、コントロールを無線化できるように取り組みたい。

## 6. おわりに

本研究では、収納性と伸縮性を備えたロボットアームを提案し、軽量化した小型装着型ロボットアーム xLimb を提案した。評価実験を通して、本システムの収納性や利便性などを評価し、本デバイスのパフォーマンスおよび研究の方向性を検証した。

今後の課題として、全体的な構造を最適化し、本システムのさらなる軽量化や可動範囲の拡大を検討し、動作の柔軟性の強化を図ることである。また、人間工学に基づきユーザーが制御しやすいコントローラを模索するとともに、自動的な制御手法の導入も視野に入れる。将来は、提案デバイスを用いて多様な場面に応用できることを期待する。

## 参考文献

- [1] 丁沢宇, 吉田匠吾, 中村浩太, 鳥居拓馬, 謝浩然, “伸縮機構を備えた装着型ロボットアーム xLimb の開発”, HCG シンポジウム 2020, 1-1-2, Dec. 2020.
- [2] Haoran Xie, Kento Mitsuhashi, and Takuma Torii. “Augmenting Human with a Tail”, Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019, Association for Computing Machinery, Article 35, pp.1–7, New York, NY, USA, Mar. 2019.
- [3] Bright, Lawrence, H. Harry Asada, “Supernumerary robotic limbs for human augmentation in overhead assembly tasks”, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, pp.91-95, 2017.
- [4] 吉田成朗, 鳴海拓志, 橋本直, 谷川智洋, 稲見昌彦, 五十嵐健夫, 廣瀬通孝, “ジェスチャ操作型飛行ロボットによる身体性の拡張”, 情報処理学会インタラクティブ論文誌, pp.403-408, 2012.
- [5] Akimichi Kojima, Hirotake Yamazoe, Joo-Ho Lee, “Wearable Robot Arm with Consideration of Weight Reduction and Practicality”, Journal of Robotics and Mechatronics vol.32, no.1, pp.173-182, Feb. 2020.
- [6] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. 2017. MetaLimbs: multiple arms interaction metamorphism. In ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies (SIGGRAPH '17). Association for Computing Machinery, Article 16, pp.1–2, New York, NY, USA, 2017.
- [7] Ritik Looned, Jacob Webb, Zheng Gang Xiao and Carlo Menon, “Assisting drinking with an affordable BCI-controlled wearable robot and electrical stimulation: a preliminary investigation”, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation vol.11:51, Apr. 2014.