

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	スラスト駆動型超長尺多関節アーム ” 飛龍-III ” の開発 軸形状変更によるピッチ軸剛性の向上と3 節試作機での実験
Title(English)	Development of Hiryu-III: A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters -Improvement of pitch axis stiffness by changing the shaft shape and experiments with a 3-link prototype-
著者(和文)	中出尚宏, 難波江裕之, 鈴森康一, 萩原哲夫, 遠藤玄
Authors(English)	Takahiro Nakade, Hiroyuki Nabaee, Koichi Suzumori, Tetsuo Hagiwara, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2022講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 6

# スラスト駆動型超長尺多関節アーム”飛龍-III”の開発 —軸形状変更によるピッチ軸剛性の向上と3節試作機での実験—

Development of Hiryu-III: A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters  
-Improvement of pitch axis stiffness by changing the shaft shape and experiments with a 3-link prototype-

○学 中出 尚宏 (東工大) 正 難波江 裕之 (東工大)  
正 鈴森 康一 (東工大) 正 萩原 哲夫 (横浜ケイエイチ技研)  
正 遠藤 玄 (東工大)

Takahiro NAKADE, Tokyo Institute of Technology, nakade.t.aa@m.titech.ac.jp  
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology  
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology  
Tetsuo HAGIWARA, Yokohama KH Tech Corporation  
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology

We proposed a long-reach lightweight articulated arm "Hiryu-III" using weight-compensation with thrusters and a wire-pulley system. This robot uses a wire-pulley system to keep the thruster horizontally, however the elastic deformation of the plastic tensioner causes insufficient rigidity of the pitch axis. We changed the fastening method between the tensioner and the shaft from key and keyway to a hexagonal shaft and hole. Additionally, we conducted experiments to confirm the improvement of the stiffness of the pitch axis. In addition, we conducted experiments with a 3-link prototype, and found a problem of accumulating error of the yaw joint axes. To solve this problem, we proposed a mechanism reversed upside down.

**Key Words:** Robot arm, Wire-driven, Synthetic fiber rope, Long reach articulated arm

## 1 緒言

長尺多関節アームは人が立ち入ることの難しい、もしくは危険な現場での作業に適しており、近年に至るまで開発が進められている。一方で、近年ドローンに代表されるマルチコプタの開発や点検作業への応用も盛んである。

そこで、本研究室ではスラストで自重補償を行う長尺多関節アーム”飛龍”シリーズ [1][2] を提案している。このアームではプロペラをスラストとして利用し、平行リンク機構を用いてスラストの推力方向を鉛直方向に保つという特徴を持つ。また、スラストがリンクに固定されていることによりスラストの安定性、安全性が確保され、基部にトルクが蓄積せず、長尺化にも耐えうると考えられる。また、電源供給は基部から有線で行うため、バッテリー切れの心配なく長時間動作が可能である。

筆者らは従来試作機において「細いパイプにより長尺な平行リンクを構成しているためロール軸周りの剛性が低い」という問題を解決するため、ワイヤプリー系による平行リンクと等価な機構を薄肉中空パイプに納めることで、機構的にロール軸周りのねじり剛性を高めた”飛龍-III”を提案し、試作機によりその有効性を確認した [3]。しかし、”飛龍-III”にもワイヤに張力を張るためのテンショナ部品が張力により弾性変形を起こしてしまうという課題があった。

本稿では、このピッチ軸剛性低下に対する対策とその効果を実証し、対策を施した”飛龍-III”3節、4.5 m 試作機での実験とその結果について報告する。

## 2 ”飛龍-III”の機構と改良

図1に”飛龍-III”動作時の様子を、図2に”飛龍-III”のスラスト水平保持機構を示す。太い一本のパイプをリンクとすることで、ロール軸の機械的な剛性を向上させ、その内部にワイヤプリー系を構成することで、平行リンク機構と等価な機構を実現する。この機構により、ロール軸剛性を保ったままスラストを水平に保つことが可能である。手先側のプリーにはねじが切っており、溝にワイヤを数周巻きつけることにより、ワイヤに十分な張力がかかっていれば摩擦力により大きなトルクを保持することができる。そこでワイヤに張力を付加するため、根本側には3D プ



Fig.1 Hiryu-III

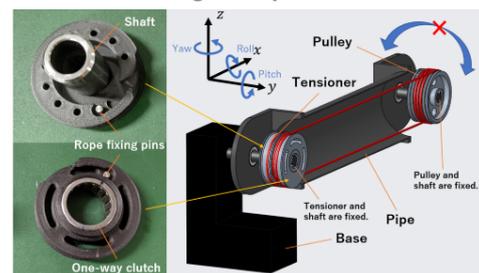


Fig.2 Proposed mechanism [3]

リントで出力した部品と金属シャフト・ワンウェイクラッチを用いたテンショナをプリーとして用いている。テンショナの写真を図2に示す。

### 2.1 軸形状の変更によるピッチ軸剛性の向上

課題となっていたテンショナの変形の原因は、シャフトとの接合部にあると考えられた。以前はシャフトとテンショナの締結のためにキーを用いていた。テンショナの変形を危惧してキーを4本用いて締結させていたが、先の実験で変形が生じてしまった。

そこで図3に示すように、テンショナには六角形断面となる軸穴を、シャフトには同じく六角形断面の軸を機械加工で製作し、これらを圧入することで締結することとした。この手法は金澤らによる軸締結手法を用いたものである [4]。

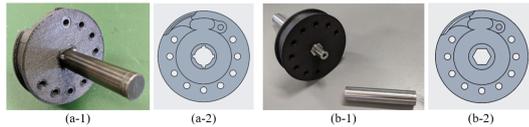


Fig.3 Hole shape of the tensioner (a:Old b:New)

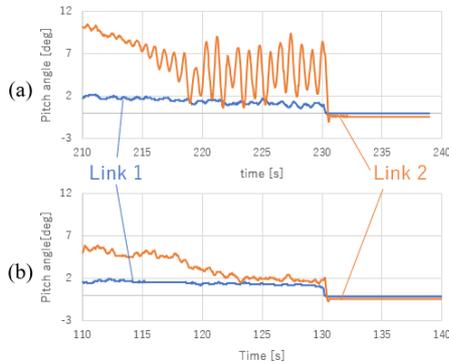


Fig.4 Landing comparison (a:Old b:New)

この効果を確認するため、テンショナを変更した2節試作機での実験を行った。図4は、旧モデル・新モデルそれぞれの着地前20秒間の動作である。Link 1が根本節、Link 2が手先節であり、ともに根本側に装備したエンコーダでピッチ関節角を測定している。ともに着地前10秒間のピッチ角指令値は0 degとしている。旧モデルにおいては着地前10秒間において大きな振動が見られる。これは、地面付近では地面効果によりスラストによる揚力が空中に比べ変動してしまうことによる振動である。一方、新モデルでは振動せずに着地ができています。これは地面効果による揚力変動を十分支持できるだけのピッチ軸剛性を持つことを意味し、テンショナの設計変更によるピッチ軸剛性の向上が確認されたと言える。

## 2.2 アルミ導線による軽量化

この長尺アームロボットは電源を基部に集中させることができるため、アーム浮上部分の軽量化、及びバッテリー切れが生じないという利点がある。しかし、各節のスラスト駆動用電源などは根元から各節まで電源線を通す必要がある。そのため節が多くなるにつれ、根元近くの節を通る電源線の数が増えていくという問題があり、電源線の軽量化も課題の一つであった。

そこで、各アーム内部では電源線の曲げが生じないことに着目し、アルミ線を電源線として使用することを提案する。アルミ線は通常用いられる銅撚線ケーブルと比べ軽量である。また、柔軟性に課題があるが、今回のロボットではパイプ内を通し、曲げなどの変形は発生しないためこの点は問題にならない。銅及びアルミの電気抵抗値から必要な電流値から必要断面積を算出し、十分な面積が確保できる直径のアルミ線を選択する。絶縁には熱収縮チューブを用いる。

今回、電源線として用いていた AWG16 相当の電源線の代替品として、直径 2 mm のアルミ線を選択した。これにより、電源線質量の 50 % の質量削減に成功した (図 5)。

## 3 実験

以上の設計変更を適用し、2節、及び3節試作機での実験を行った。実験は十分な電源が確保できる屋内環境で行った。基部は横転防止のため、60 kg の重りを乗せることで固定した。2節では着地時の振動無く、正常に浮上及び制御に成功した。

しかし、3節では前後に倒れてしまう結果となった。この実験により、ピッチ軸の傾きが節を増やすごとに累積し、さらにスラストが傾くことによりその傾きを増加させる方向の水平方向の力が生じてしまう正のフィードバック系になっていたことが判明した。この様子を模式的に図6に示す。これはこのロボットのコンセプトである、電源さえ確保できれば任意に節数を増やすことのできる構造に反する、本質的な課題である。

そこで、図7に示すような機構の変更を提案する。これまでは各節を上へ上へ積み上げる形で接続していたが、逆に下へ下へと



Fig.5 Power line (a: AWG16 copper, b: Ø2 mm Aluminum)

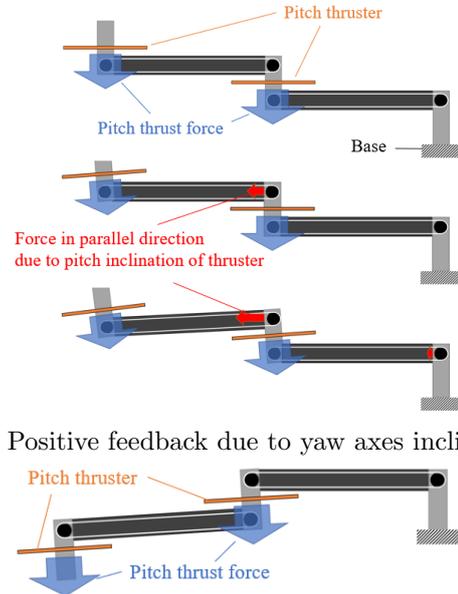


Fig.6 Positive feedback due to yaw axes inclinations

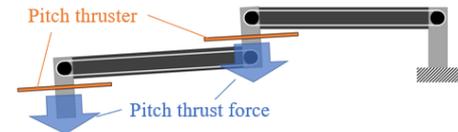


Fig.7 Newly proposed configuration to achieve a negative feedback loop

接続する形をとる。このような機構を取れば、地面効果によりスラストが前後に傾いたとしてもその傾きが補正される方向の水平方向の力が発生するため、負のフィードバックとなり安定性が向上すると考えられる。

## 4 結言

スラストを用いて自重補償・制御を行う長尺多関節アーム”飛龍-III”の課題を解決すべく、部品の一つであるテンショナの再設計及び実験を行った。テンショナの設計変更によるピッチ軸剛性の向上は確認されたが、新たにシステムが正のフィードバック系となっているという問題が発覚した。今後は素材の変更、機構の変更といった対策を講じつつ再実験を行い、課題の解決が確認され次第長尺化への検討を進め、最終的には全長 30 m、ペイロード 5 kg を目指す。

## 参考文献

- Endo, G., Hagiwara, T., Nakamura, Y., Nabae, H., and Suzumori, K., "A proposal of super long reach articulated manipulator with gravity compensation using thrusters", 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp.1414-1419, 2018.
- Ueno, Y., Hagiwara, T., Nabae, H., Suzumori, K., Endo, G., "Development of Hiryu-II: A Long-Reach Articulated Modular Manipulator Driven by Thrusters", IEEE Robotics and Automation Letters, Volume. 5, No. 3, pp. 4963-4969, 2020.
- 中出 尚宏, 難波江 裕之, 鈴森 康一, 萩原 哲夫, 遠藤 玄, "スラスト駆動型超長尺多関節アーム”飛龍-III”の開発—ワイヤブリー系による平行リンク機構と中空パイプを用いたねじり剛性の向上—", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2021, p.1P2-B09, 2021.
- H. Kanazawa, H. Nabae, K. Suzumori and G. Endo, "Empirical Study for 3D-Printed Robot Design: Dimensional Accuracy of a Hole and Proposal of a New Shaft-Fastening Method," 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2022, pp. 633-639