T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 論題(和文) | スラスタ駆動型超長尺多関節アーム"飛龍-III"の開発 ―ワイヤープーリ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― |
| Title(English) | Development of Hiryu-III: A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters -Improvement of torsional rigidity using a hollow pipe and parallel link mechanism with wire-pulley system- |
| 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 Nabae, 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2021 予稿集, , , |
| Citation(English) | Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , |
| 発行日 / Pub. date | 2021, 6 |

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

# スラスタ駆動型超長尺多関節アーム"飛龍-III"の開発
## —ワイヤープーリ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—

# Development of Hiryu-III: A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters
## -Improvement of torsional rigidity using a hollow pipe and parallel link mechanism with wire-pulley system-


○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. The robot developed in this study equipped with two thrusters for weight-compensation and pitch axis motion control in each joint. The previous study, Hiryu-II, had the disadvantage of low rigidity around the roll axis. To solve this problem, we propose a method using wire-pulley system in a single pipe, which is equivalent to a parallel link mechanism. Based on the above consideration, we fabricated a robot and conducted a motion experiment. As a result, the robot was successfully operated with two links, however the vibration occurs at landing. This was caused by the low rigidity of the pitch axis, and it is considered that the main factor of this problem is the elastic deformation of the keyway of the tensioner of the wire-pulley system.



***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．しかし，マルチコプタはその安全性の面から，日本では航空法による規制がかけられている．

そこで，本研究室ではマルチコプタのようにスラスタ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タとして利用し，スラスタの推力方向を鉛直方向に保つため，平行リンク機構を採用している．この手法により，アームの姿勢によらずスラスタ出力をほぼ一定にし，制御を簡潔にすることに成功した．また，スラスタがリンクに固定されていることによりスラスタの安定性，安全性が確保され，基部に自重補償によるトルクが蓄積しないため，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，バッテリ切れの心配なく長時間動作が可能である．

しかしながら，"飛龍-II"[2]にはロール軸（アーム長手方向）のねじりに弱いという欠点があった．これは平行リンク機構のジョイントの強度が低く，弾性変形が生じてしまうことによるものであった．これにより左右方向の位置制御が安定しない問題が生じていた．本報告では，ワイヤ-プーリ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することを目的とする．

## 2.　提案する機構

今回提案する機構を図 2 に示す．まず，"飛龍-II"[2]までは平行リンク機構を用いていたアーム長手方向の二本のリンクを

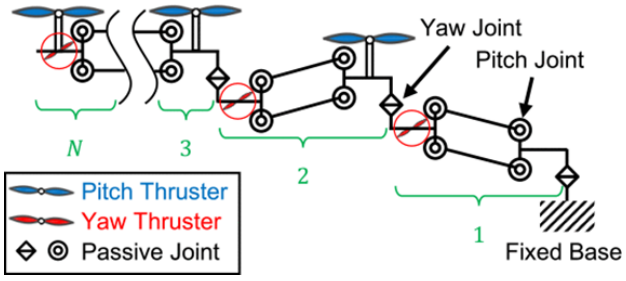


Fig. 1 The mechanism of Hiryu-II [2]

一本の太いパイプに置き換える．これにより，ロール軸周りの剛性はこれまでの"飛龍"シリーズに比べ飛躍的に向上する．

また，パイプの内部にワイヤ-プーリ系で平行リンク機構と等価な働きをする機構を構成する．プーリとテンショナは有効径が等しく，それぞれのシャフトに対して回転できないようにキーで固定されている．これに対し，パイプはシャフトに対して自由に回転できるようにベアリングを介してプーリと同じシャフトに固定されている．テンショナは図 3 に示すように二つに分かれた機構を持つ．金属シャフトとワンウェイクラッチがテンショナの各部品にそれぞれ圧入・接着してあり，巻き付け後に張力をかけることが可能である．ワイヤは端部を二重八の字結びにして圧入した金属ピンに引っかける形で固定する．プーリは摩擦力を十分に得るためメートルねじを切り，これにワイヤを複数回巻きつけることで溝プーリとして用いる．ワイヤを巻きつけた後にテンショナを用いて十分な初期張力をかけることにより，ワイヤとプーリ間の相対運動が生じないようにする．

この機構の利点としてロール軸の剛性が向上する点に加え，通常の平行リンク機構では節同士が干渉し合うことで困難だった 360 deg 全方向の回転が可能であることも挙げられる．

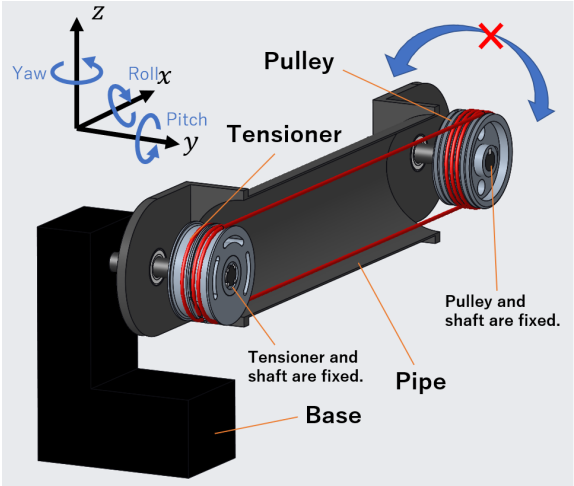


Fig. 2 Proposed mechanism

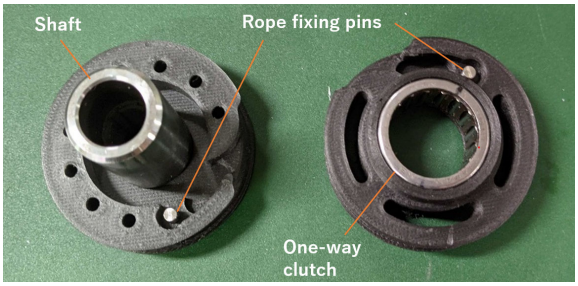


Fig. 3 Tensioner

## 3. 試作機の製作

前節までをもとに，”飛龍−III”試作機の製作を行った．先行研究では平行リンク機構の節同士が干渉するためピッチ軸の上側可動範囲は+45 deg 程度が限界で，+90 deg 近くに上げることができなかったが，今回の手法を利用した結果可能となった．ワイヤは柔軟な端部処理が可能で，高強度，軽量かつクリープ伸びの少ない化学繊維ロープ(DY-20ZL：ハヤミ工産)を用いる．化学繊維ワイヤは大きな初期伸びが発生してしまうことが欠点であるが，細川らによる延伸装置[3]を用いて 2000 N のプリストレッチを行うことでこれを最小限に抑える．

## 4. 動作実験

製作した試作機での動作実験を行った．横転を防ぐため，基部に 40 kg の重りを設置し，風などの外乱のない屋内で実験を行った．まず 1 節での動作を確認後，2 節での実験を行った．

2 節での動作の様子を図 4，関節角の時刻歴を図 5 に示す．根本節を 1 節目，手先節を 2 節目とする．1 節モデルではピッチ軸に 70 度という大きな角度での制御に成功し，2 節モデルにおいてもそれぞれピッチ軸 30 度での制御に成功した．ピッチ軸での誤差は 1 節 2 節ともに±3 deg 程度であった．ヨー軸での誤差は 1 節では±1 deg 程度，2 節では±3 deg 程度であった．”飛龍-I ”[1]では特にヨー姿勢角の制御に課題があった．そのため，このように制御面における工夫無しでヨー軸に対して正確に追従できていることは大きな成果と言える．しかし 2 節モデルにおいて，浮上時は問題なく制御できたが，着地時にピッチ軸周りで振動が生じてしまうという現象が生じた．振動の原因としてはスラスタが地面近くで動作してしまうために起きる地面効果が考えられるが，ピッチ軸の剛性が低下していることも要因の一つであると考えられる．この剛性低の原因を調査した結果，テンショナのキー溝部分での弾性変形が主たる原因であると現時点では推察している．

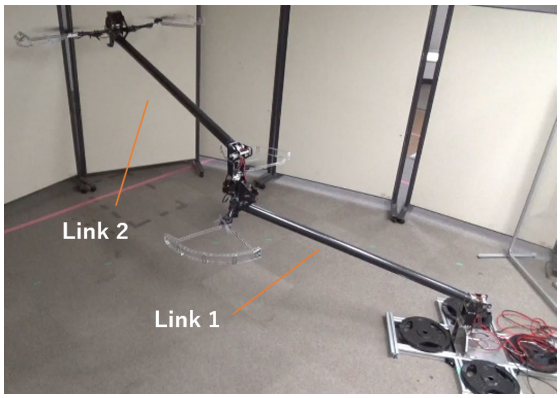


Fig. 4 Operation experiment of the robot

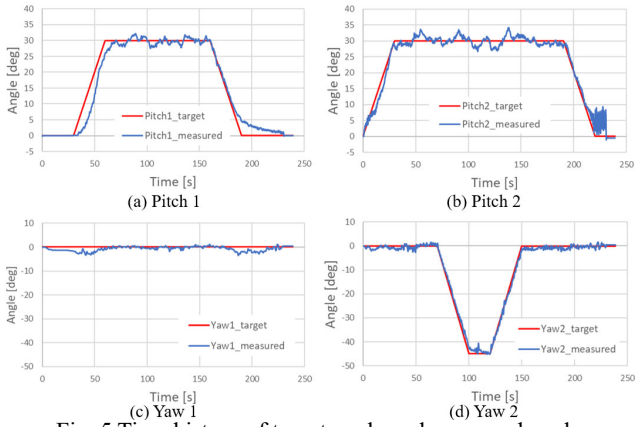


Fig. 5 Time history of target angle and measured angle of two bar model.

## 5. 結言

スラスタを自重補償に用いる長尺多関節アームロボット”飛龍”シリーズの後継機となる”飛龍-III”の開発を行った．本ロボットにおいてロール軸の剛性を向上させるため，”飛龍-II”[2]までは 4 つの節を用いて構成していた平行リンク機構を一本の太パイプとワイヤ-プーリ系で代替する手法を提案した．この手法を用いて”飛龍-III”の試作機を製作し，実機での実験を行った．その結果，期待通りの動作が可能であることは示せたが，樹脂製であるテンショナを大きな力が加わる用途で使うには，滑りとは別に，樹脂の弾性変形という課題が残ることが判明した．今後再設計を行い，ピッチ軸剛性が確保できたことを確認次第，さらなる長尺化を目指し，最終的には全長 30 m，ペイロード 5 kg を目指す．

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04044 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 細川 兼奨，萩原 哲夫，遠藤 玄，”高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討—第九報:高強度化学繊維ロープ用小型延伸装置の開発—”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 講演概要集, 2020.