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-II ”の開発 -12 m 試作機の浮上実験-
Title(English)	Development of Hiryu-II:A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters -Floating experiment of a 12-m-long prototype-
著者(和文)	上野雄祐, 萩原哲夫, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Yusuke Ueno, Tetsuo Hagiwara, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2021講演論文集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
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-II”の開発
-12 m 試作機の浮上実験-

Development of Hiryu-II:
A Super Long Reach Articulated Manipulator Driven by Thrusters
-Floating experiment of a 12-m-long prototype-

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

Yusuke UENO, Tokyo Institute of Technology
Tetsuo HAGIWARA, Yokohama KH Tech Corporation
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

Robotic manipulators using thrusters for weight compensation are an active research topic due to their potential to exceed the limits of maximum length. Due to the constraints of the cubic-square law, the structure of large manipulators must be flexible, making hardware development a very difficult issue. This paper focuses on overcoming these problems by installing inertial measurement units and microcontrollers in each unit to control thrusters locally and suppress torsional deformation around roll axis of the manipulator. As a means of realizing such a manipulator, we adopted the mechanism of Hiryu-II, which was previously developed by our research group. The prototype which is 9.3-m-long with 6 DOF was controlled its joint positions and the prototype which is 12.4-m-long with 8 DOF was floated successfully. These results surpassed the maximum length of the manipulator achieved by previous studies.

Key Words: Long reach manipulator, Redundant manipulator, Thruster, Weight compensation

1　緒言

長尺多関節アームは，インフラ点検や福島第一原発の廃炉作業，農薬散布などに有効である．しかし，どのように自重補償を行うかという厳しい制約があることから，長尺多関節アームのハードウェアの開発は困難である．

本研究室では，スラスタで自重補償を行う長尺多関節アーム”飛龍”[1] を提案している．外部に無限のエネルギー源があると仮定すれば，各スラスタを適切な位置に配置し推力を制御することで長尺化を実現可能である．スラスタとして水の噴流を用いる研究 [2] も見られるが，水は重く自重を支えるための十分な噴流を得ることが難しいことから，長尺化には限界があると考えられる．電磁モータにより駆動されるプロペラを採用すれば，電力線を数珠繋ぎすることで容易に長尺化可能である．プロペラにより関節を駆動するアームの研究に LASDRA[3] もあるが，その研究ではプロペラ推力で球対偶関節に 3 軸力を発生させることが目的であるため，1 節当たり 8 個のプロペラを要している．これは自重補償に寄与しないアクチュエータが多いことを意味するため，同じく長尺化に限界があると考えられる．

そこで，スラスタが常に重力方向に沿うよう平行リンク機構を導入し，より実用的で簡素なシステムを目指した [1][4]．全長については本研究室で過去に開発した Giacometti Arm[8] の 20 m を参考とし，さらにペイロード 5 kg を設定した．平行リンク機構によりリンクの姿勢に依存することなく推力を一定に保つことができ，制御の大幅な簡素化が可能となった．しかし，開発した試作機”飛龍-II”の手先位置を制御可能であったのは全長 6.6 m 全 6 自由度まで（図 1），浮上可能であったのは全長 8.8 m 全 8 自由度までであった．更なる長尺化のために顕在化した課題は，細長いアームのロール軸周りのねじり変形と電気配線の質量への対処である．

本稿では，試作機”飛龍-II”の各節に慣性計測装置 (IMU) とマイクロコントローラを搭載し，複数のスラスタを制御してねじり変形を抑えることを提案する．各節ごとにローカルに制御することで，電気配線の 1 本あたりの長さを減らし軽量化も可能となる．そして全長 12 m 全 8 自由度の試作機の浮上実験を行い，提案手法の有効性を示す．

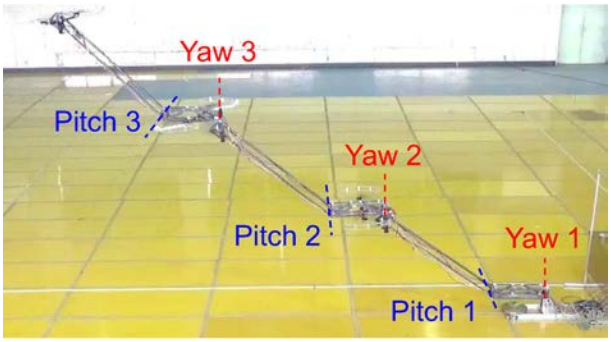
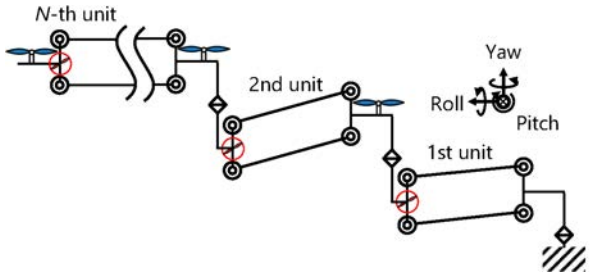


Fig.1: Previously developed Hiryu-II (6.6-meters-long).

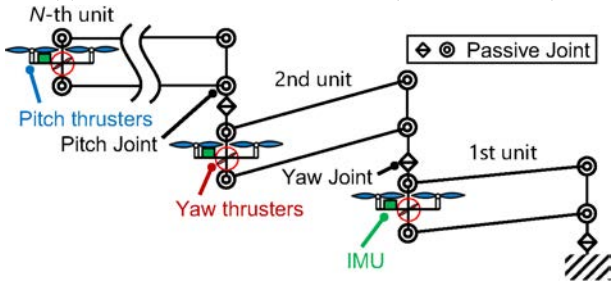
2　開発したロボットアーム

図 2 に以前開発した試作機”飛龍-II”と本稿で提案するアームの構成を示す．アームのロール軸周りのねじり変形を抑制するため，自重補償を行うスラスタの推力差を IMU の計測値に基づき PID 制御で操作する．推力差によるプロペラの反トルクを無視可能，ロール・ピッチの 2 軸の姿勢制御が可能などの利点があるため，関節位置制御の安定のためには 4 基 1 組のスラスタによる自重補償が望ましいと考えられる．さらに自重による曲げモーメントが生じなくなるよう，ピッチ関節の位置をヨー関節の軸上へと変更した．

次に開発した試作機”飛龍-II-C”の 3D CAD モデルを図 3 に，



(a) Previously developed Hiryu-II (6.6-meters-long).



(b) Proposed manipulator.

Fig.2: Comparison of mechanism configuration.

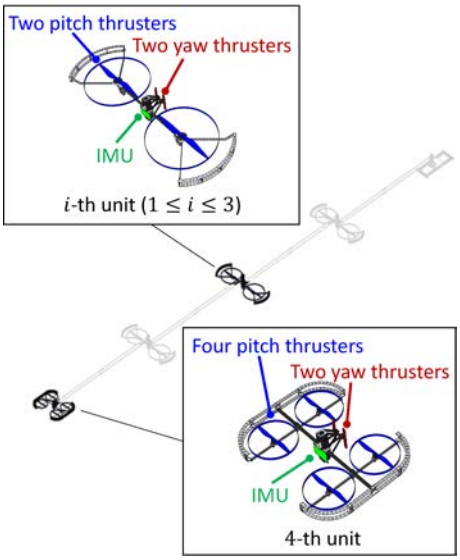


Fig.3: 3D CAD model of the prototype Hiryu-II-C.

諸元を表 1 に示す． 第 1 節から第 3 節は 2 基 1 組のスラスタにより PID 制御でピッチ関節の位置制御とロール軸の水平姿勢制御を行い，第 4 節は 4 基 1 組のスラスタにより PID 制御でピッチ関節の位置制御とロール・ピッチの 2 軸の水平姿勢制御を行う．第 1 節から第 3 節について 2 基 1 組のスラスタを採用したのは，4 基 1 組のスラスタの設計推力 14.5 N/基 に対し実測で得られた最大推力が 10 N/基 と不足していたためである．2 基 1 組のスラスタとして採用したアクチュエータやモータドライバは，以前に開発した飛龍-II のものと同様である．IMU を含む質量 0.1 kg の制御基板を各節に搭載することにより，第 1 節では中継する電気配線のうち信号線を 52 本から 3 本へと減らすことができ 0.5 kg の軽量化が達成された．

3　実験

はじめに第 2 節から第 4 節のピッチ・ヨー関節のみ駆動させる実験を行った．地面設置時を基準として，第 4 節，第 3 節，第 2 節のピッチ関節の目標位置をそれぞれ 0 deg から 4 deg まで 0.4 deg/s，0 deg から 15 deg まで 1.5 deg/s，0 deg から 10 deg まで 0.5 deg/s で変化させることでアームを浮上させた．そしてアームの浮上後，相対角を基準として各節ヨー関節の目標位置を

Table 1: Specifications of the prototype Hiryu-II-C.

Length	12.4 m
Width	1470 mm
Mass	19.2 kg
	(Arm:11.3 kg, Base:7.9 kg)
DoF	8 (Pitch 4, Yaw 4)
Range of Motion	Pitch : ±40 deg
	Yaw : ±45 deg

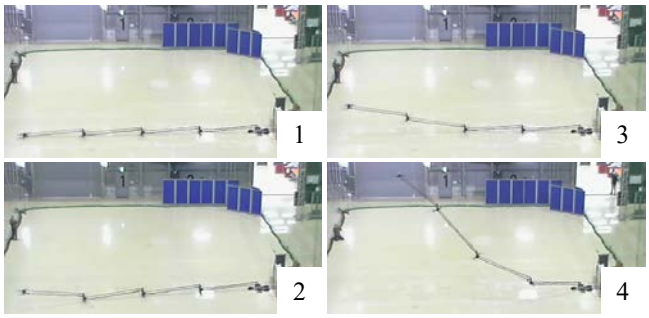


Fig.4: Snapshot of the experiment.

0 deg から段階的に 10 deg，−10 deg，0 deg へと 1 deg/s で変化させることで，目標値への追従を確認した．次にすべての節の浮上実験では，すべてのヨー関節の目標位置を相対角 0 deg で一定とした．第 4 節から順にピッチ関節の目標位置を 0 deg から 15 deg まで 0.75 deg/s で変化させることで，図 4 に示す通りすべての節の浮上に成功した．以前の研究ではロール軸周りのねじり変形を抑える制御系を備えていなかったことにより，全長 6.6 m アームの手先位置制御，全長 8.8 m アームの浮上が長尺化の限界であった．提案手法では IMU と自重補償スラスタによりロール軸周りのねじり変形が補正可能なこと，および電気配線の軽量化が貢献し，全長 9.3 m アームを手先位置制御可能，また全長 12.4 m アームを浮上可能となったのだと考えられる．

4　結言

本稿では，試作機”飛龍-II”の各節に慣性計測装置 (IMU) とマイクロコントローラを搭載し複数のスラスタを制御してねじり変形を抑えることを提案し，試作機による全長 9.3 m アームの手先位置制御実験，全長 12.4 m アームの浮上実験により有効性を示した．今後は更なる長尺化に取り組み，全長 20 m，8 自由度，ペイロード 5 kg の試作機の実現を目指す．

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] G. Endo, T. Hagiwara, Y. Nakamura, H. Nabae, and K. Suzumori, “A proposal of super long reach articulated manipulator with gravity compensation using thrusters,” in *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE. IEEE, 2018, pp. 1414–1419.

[2] H. Ando, Y. Ambe, A. Ishii, M. Konyo, K. Tadakuma, S. Maruyama, and S. Tadokoro, “Aerial hose type robot by water jet for fire fighting,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 1128–1135, April 2018.

[3] H. Yang, S. Park, J. Lee, J. Ahn, D. Son, and D. Lee, “Lasdra: Large-size aerial skeleton system with distributed rotor actuation,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE. IEEE, 2018, pp. 7017–7023.

[4] Y. Ueno, T. Hagiwara, H. Nabae, K. Suzumori, and G. Endo, “Development of hiryu-ii: A long-reach articulated modular manipulator driven by thrusters,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4963–4969, 2020.