T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	スラスタ駆動型軽量長尺多関節アーム“ 飛龍-II ”の開発―姿勢変化によるアーム長手軸周りモーメントの補償方法の検討―
Title(English)	Development of Super Long Reach Articulated Manipulator with Weight Compensation and Joint Drive by Thrusters-A Study on Compensation Method of Moment around Longitudinal Axis of the Manipulator-
著者(和文)	上野雄祐, 遠藤 玄, 鈴森 康一, 難波江裕之, 萩原哲夫
Authors(English)	Yusuke Ueno, Gen Endo, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Tetsuo Hagiwara
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 予稿集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2019, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

スラスタ駆動型軽量長尺多関節アーム“飛龍-II”の開発
ー姿勢変化によるアーム長手軸周りモーメントの補償方法の検討ー

Development of Super Long Reach Articulated Manipulator with Weight Compensation and Joint Drive by Thrusters
-A Study on Compensation Method of Moment around Longitudinal Axis of the Manipulator-

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

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

Recently long reach articulated manipulator is widely required for infrastructure inspection. Long reach manipulator can be realized by using thrusters for weight compensation. In this research, we propose a super long reach manipulator with weight compensation and joint drive by thrusters. Considering the static influence of weight and its longitudinal direction moment of the manipulator, the force required for each thruster was obtained analytically. The result of the analysis showed that the weight compensation force is constant, but the longitudinal direction moment caused by the weight depends on the arm posture. After that, we designed a system which controls joint angle with the simple PID controller and the feedforward term, and confirmed its validity by dynamic simulation of the 2 units model. Moreover, we developed 2 units prototype whose length was 4.3 meters and confirmed its basic motion.

***Key Words*:** Long-reach manipulator, Weight compensation, Thruster, Drone

1　緒言

全国に多数存在する橋梁やトンネルは，触診や打音検査による定期点検の実施が義務付けられている [1]．この点検作業を省力化するためには，広い可動範囲を持つ長尺アームの開発が有効である．

本研究室では，長時間の作業性や安全性にも優れたロボットシステムとして，地上に固定された基部と自重補償用のスラスタを搭載する長尺多関節アーム“飛龍-I”[2] を提案した．このアームは，スラスタの推力により駆動されるピッチ軸受動関節と，サーボモータで駆動を行うヨー軸能動関節を軽量な構造材で接続した構成であった．しかし，アームの自重に伴うロール軸方向のねじれによりヨー軸関節の運動制御が困難となることから，長尺化の限度は 3 m であった．

また，スラスタにより自重補償を行う長尺アームの他の先行研究としては，Yang らの“LASDRA”[3] も存在する．このアームは，回転 3 自由度を持つ関節を構造材で連結し，各関節をスラスタで受動的に駆動する構成であった．しかし，各節に 8 つのスラスタを搭載しているため，アーム部の重量はその分増加していた．更に，スラスタの配置が非対称なことから，自重補償に過剰なエネルギーが必要であった．文献 [3] では全長 3 m の試作機の開発にとどまっていたが，こちらも長尺化に限度があると考えられる．

そこで，本研究では更なる長尺化のため，自重補償と同様にスラスタを用いたヨー軸関節の駆動機構を持つ多関節アーム“飛龍-II”を提案する．更に，ロール軸周りのモーメントの補償方法についても提案を行う．そして，試作機を用いて提案するアームの運動制御が実現可能であることを示す．

2　“飛龍-II”の提案

本研究で提案するアームの機構構成を図 1 に示す．各節にピッチ軸関節とヨー軸関節を駆動するためのスラスタをそれぞれ 2 つずつ搭載しており，推力によってすべての関節が受動的に動く．ピッチ軸関節は平行リンク機構で構成されている．また，その駆動用のスラスタはアームの自重補償を行うほか，個々の推力を制御してロール軸周りのモーメントの補償も行うため，機体の左右に 1 つずつ搭載している．スラスタとして，本研究ではプロペラを採用している．

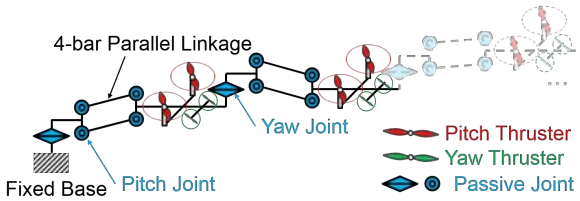

Fig.1 Mechanism of the proposed manipulator

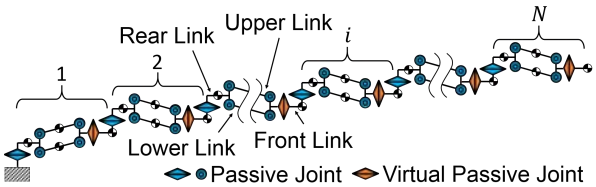

Fig.2 N units model of the static analysis

3　アームの静力学解析と動力学シミュレーション

自重およびそれに伴うロール軸周りのモーメントを補償するため，図 2 に示す N 個の節から成るアームの静力学解析を行った．アームを構成する各リンクを剛体近似し，ロール軸方向の仮想受

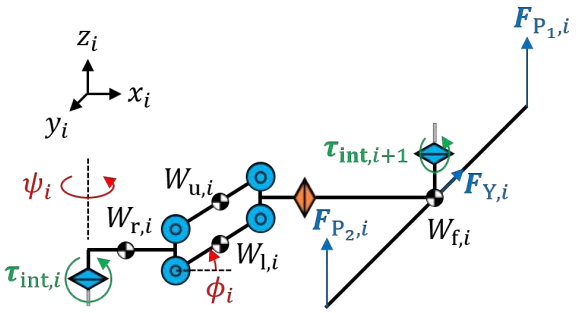

Fig.3 i-th unit model of the static analysis

Table 1 Parameter of the i-th unit model

$\boldsymbol{W}_{\mathrm{r},i}, \boldsymbol{W}_{\mathrm{u},i}, \boldsymbol{W}_{\mathrm{l},i}, \boldsymbol{W}_{\mathrm{f},i}$	Weight of the link
$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{int},i}$	Internal moment of the rear link
$\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}_1,i}, \boldsymbol{F}_{\mathrm{P}_2,i}, \boldsymbol{F}_{\mathrm{Y},i}$	Thrust force for driving passive joint
ϕ_i	Angle of the pitch joint
ψ_i	Angle of the yaw joint
l_{r}	Length of the rear link
l_{t}	Moment arm of $\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}_1,i}, \boldsymbol{F}_{\mathrm{P}_2,i}$

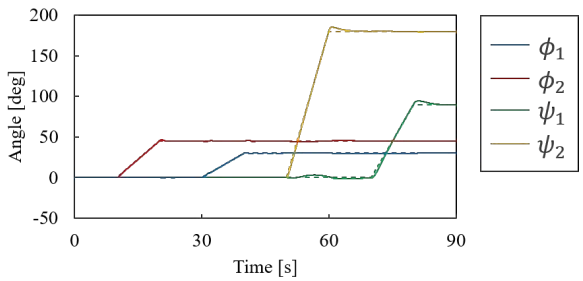

Fig.4 Time history of the joint angle in simulation

動関節を追加することで力とモーメントの釣り合いを解いた．ただし，各リンクの重心はすべて中点に一致するものとし，プロペラの回転による反トルクの影響は無視して考えた．なお，アームの根本から i 番目の節（$1 \leq i \leq N$）に関する各変数の定義については，図 3 および表 1 を参照されたい．

静力学解析により，式 (1) ～ 式 (4) を得た．ここで，スカラーは各ベクトルの大きさを表していることに注意されたい．

$$F_{\mathrm{P}_1,i} + F_{\mathrm{P}_2,i} = \frac{W_{\mathrm{u},i} + W_{\mathrm{l},i}}{2} + W_{\mathrm{f},i} + W_{\mathrm{r},i+1} + \frac{W_{\mathrm{u},i+1} + W_{\mathrm{l},i+1}}{2} \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{P}_1,i} - F_{\mathrm{P}_2,i} = \frac{\tau_{\mathrm{int},i+1,y} \sin \psi_{i+1}}{l_{\mathrm{t}}} \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{Y},i} = 0 \tag{3}$$

$$\tau_{\mathrm{int},i} = \frac{(W_{\mathrm{r},i} + W_{\mathrm{u},i} + W_{\mathrm{l},i})\, l_{\mathrm{r}}}{2} + \tau_{\mathrm{int},i+1,y} \cos \psi_{i+1} \tag{4}$$

i 番目の節（$1 \leq i \leq N-1$）の自重補償に必要な 2 つのピッチ軸関節駆動用スラスタの推力の和 $F_{\mathrm{P}_1,i} + F_{\mathrm{P}_2,i}$，およびヨー軸関節駆動用スラスタの推力 $F_{\mathrm{Y},i}$ については一定となることが分かった．また，ロール軸周りのモーメント補償に必要な推力差 $F_{\mathrm{P}_1,i} - F_{\mathrm{P}_2,i}$ については，後部リンクに加わる力がモーメントアームを持つため，式 (2)，式 (4) を用いて漸化式で表現できることが分かった．モーメントアームは各ヨー軸関節の角度に依存することから，2 つのピッチ軸関節駆動用スラスタの推力差はアームの姿勢に基づき変化させる必要がある．

これらの知見を基に，2 節 4 自由度モデルの動力学シミュレーションを行った．各スラスタ推力の制御方法は，PID 制御器に関節角度をフィードバックし，目標角度と補償推力をフィードフォワードで与えるというものである．シミュレーションより得られた関節角度の時刻歴を図 4 に示す．破線は角度の目標値を表している．2 つのピッチ軸関節駆動用スラスタの推力差を制御することで，アームのヨー軸関節角度を変化させた場合も目標角度への追従が可能となることを確認した．

Fig.5 Prototype of the proposed manipulator

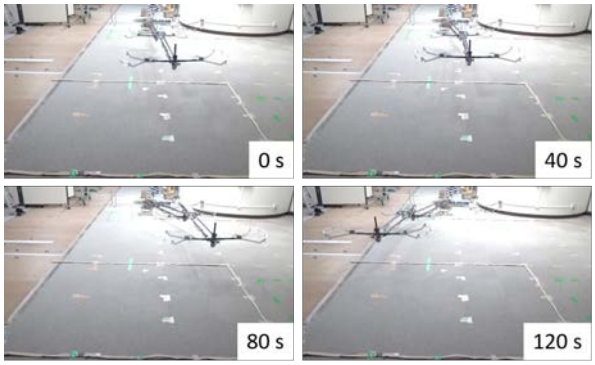

Fig.6 Motion when moving yaw angle of the prototype model

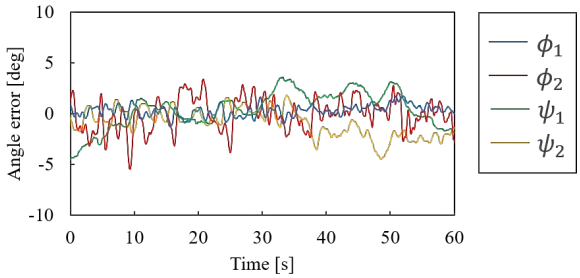

Fig.7 Time history of the angle error in experiment

Table 2 RMS of the angle error in experiment

ϕ_1	0.78°
ϕ_2	1.75°
ψ_1	3.02°
ψ_2	1.08°

4　2 節 4 自由度モデル試作機の動作実験

スラスタによる自重補償と関節駆動，および推力制御の原理を確認するため，図 5 に示す 2 節 4 自由度の試作機（全長 4.3 m）を用いて，ピッチ軸関節角度の目標値を 0° に保ちながらヨー軸関節角度の目標値を時間変化させる実験を行った．実験中のアームの動作の様子を図 6 に示す．前節で提案したロール軸周りのモーメントの補償方法により，ピッチ軸とヨー軸の各関節角度が目標値に追従することを確認した．

更に，アームの位置制御の精度を調べるため，各関節角度の目標値を以下のように与える実験を行った．

- $\phi_{1,\mathrm{d}} = \phi_{2,\mathrm{d}} = \psi_{1,\mathrm{d}} = \psi_{2,\mathrm{d}} = 0°, (0\,\mathrm{s} \leq t \leq 60\,\mathrm{s})$

実験より得られた各関節角度の偏差の時刻歴は図 7，RMS 値については表 2 の通りであった．スラスタによる関節駆動方法は従来のアームに比べ位置精度が低くなるものの，関節角度をフィードバックし推力制御を行うことで一定姿勢で定在可能なことを確認した．

5　結論

本研究では，スラスタによる自重補償と関節駆動を行う軽量冗長多関節アームを提案した．また，個々のスラスタの推力制御によるロール軸周りのモーメントの補償方法を提案し，アームの静力学解析の結果を踏まえ，2 節 4 自由度モデルの動力学シミュレーションで関節角度制御を行うことにより実現可能性を示した．さらに，提案したモーメントの補償方法を用いることで，全長 4.3 m の試作機の運動制御を実現した．

謝辞

この成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです．

参考文献

[1] 国土交通省. `http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html`, 2019/2/09 閲覧.

[2] Gen Endo, Tetsuo Hagiwara, Yoshihide Nakamura, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori. A proposal of super long reach articulated manipulator with gravity compensation using thrusters. In *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1414–1419. IEEE, IEEE, 2018.

[3] Hyunsoo Yang, Sangyul Park, Jeongseob Lee, Joonmo Ahn, Dongwon Son, and Dongjun Lee. Lasdra: Large-size aerial skeleton system with distributed rotor actuation. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 7017–7023. IEEE, IEEE, 2018.