ダチョウ首の解剖学に基づく柔軟マニピュレータによる矢状面上の運動の実現

A Study of Sagittal Motions with a Flexible Manipulator
Based on the Anatomy of the Ostrich Neck

○学　中野 風志 (東大)　　池田 昌弘 (東大)
柯 強 (東大)　　正　翠 健仁 (筑波大)
郡司 芽久 (東洋大)　　正　望山 洋 (筑波大)
正　新山 龍馬 (東大)　　國吉 康夫 (東大)

Kazashi NAKANO, The University of Tokyo, nakano@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp
Masahiro IKEDA, The University of Tokyo, ikeda@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp
Keung OR, The University of Tokyo, or@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp
Kenji MISU, University of Tsukuba, misu.kenji.xm@alumni.tsukuba.ac.jp
Megu GUNJI, Toyo University, gunji@toyo.jp
Hiromi MOCHIYAMA,University of Tsukuba,motiyama@iit.tsukuba.ac.jp
Ryuma NIIYAMA,The University of Tokyo,niiyama@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp
Yasuo KUNIYOSHI,The University of Tokyo,kuniyosh@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Flexible manipulators have advantages such as collision safety, the ability to complete subtasks, and the realization of rational motion patterns. However, their mechanisms are too complicated to be controlled. The use of an underactuated drive system is a common solution to overcome such a problem. However, an underactuated manipulator hardly realizes rational motion patterns, high-acceleration motion, or gravity compensation. Although these features are easily realized in a vertebrate. In this study, we focused on the motion of an ostrich that skillfully manipulates its flexible neck, and developed a manipulator based on anatomical knowledge. The developed manipulator was very flexible, and we can raise its head against gravity with a neck motion pattern similar to that of an ostrich. The results of this research provide a suggestion to potentially explore muscle synergy during ostrich neck motion.

***Key Words*:** SoftRobot, Bioinspired Robot, Manipulation

1　緒言

ダチョウは、鳥類の中でも最大・最古の種であり柔軟 (多自由度かつ受動的に変形可能) な首をマニピュレータとして巧みに利用している。このような柔軟な性質は予期せぬ衝突への安全性、障害物回避などのサブタスクの実現、各関節にかかるトルクのバランスが取れた合理的な運動パターンの実現などの長所がある一方、機構の重量化と制御の複雑化を招く。このような問題に対して、工学的には、腱駆動 [1, 2] や非駆動関節 [3, 4] に代表される劣駆動システムを用いることが一般的である。しかし一般的な劣駆動システムでは、生物が実現しているような合理的な運動パターン、高加速度運動、自重補償などの点で難がある。

ダチョウは、このような機構と制御の難しさをクリアし、柔軟な首を生かしたマニピュレーションを実現している。そこで本研究はダチョウの首を規範とすることで、シンプルな柔軟マニピュレータの設計論を確立することを目的とする。

本稿では、ダチョウの首を解剖し観察することで、筋骨格構造の中から矢状面上の運動を実現するための構造を抽出し, 実装した。実現されたマニピュレータは、柔軟でありながら、重力に抗してダチョウに特有な運動パターンで首を挙上させることが出来た。また、ダチョウの首が運動する際の腹側と背側の筋の協調について、背側の筋が、単純な幾何学的な拘束を用いている可能性が示唆された。

2　ダチョウ首の解剖学的特徴

ダチョウの首は 18 個の頸椎からなっており、それぞれの頸椎は、ねじり方向に自由度を持つ第一頸椎 (Atlas) を除き、鞍型関節により結合している。これらの関節は軟骨の潤滑によりフリージョイントとなっている。このため、Dorsoventral side と Lateral side への変形が可能である。首全体には 200 以上の筋が左右対称に並走しており、表層には、多関節にまたがる発達した長筋が走行している。また深層には単関節筋が走行しており、長筋による駆動を安定化させている [5]。ダチョウの首の質量に関しては、我々の計測の結果、3.3 [kg] 程度 (頸部 2.6 [kg], 頭部 0.7 [kg] 程度) であることが分かった。

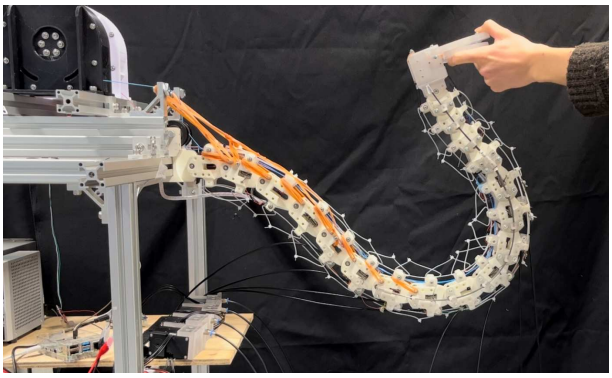

Fig.1 Ostrich inspired flexible manipulator

2.1　ダチョウ首の矢状面上の運動

ダチョウが定型的に行う採餌行動は、図 2 のような矢状面上の運動とみなせる。この運動は主に、Rolling Pattern と Lever Pattern と呼ばれる動作に大別される。Rolling Pattern とは首の頭側（Cranial）を伸展させるとともに尾側 (Caudal) を屈曲させることによって頭部を地面に対して水平に保ったまま首を挙上させる動作である。Rolling pattern は、多足歩行に比べてバランスの悪い 2 足歩行である、鳥類のマニピュレータの運動パターンとして合理的であることが指摘されている。Lever Pattern と

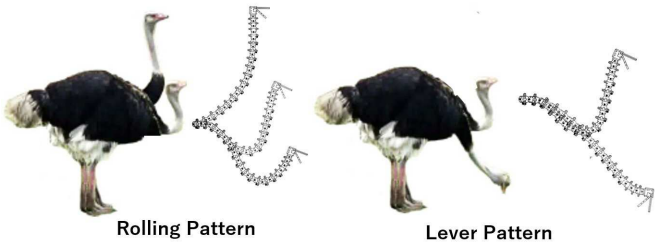

Fig.2 Sagittal motion of the ostrich inspired flexible manipulator

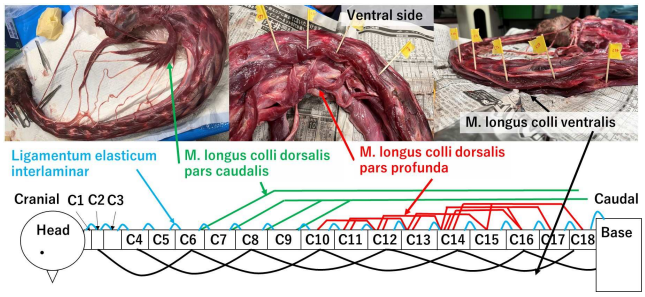

Fig.3 A dissected ostrich

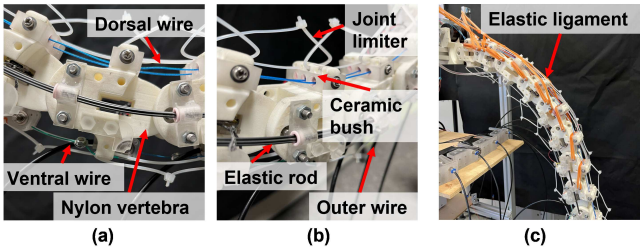

Fig.4 Detailed view of the vertebra

は、ついばみ動作のことであり、2 リンクマニピュレータとしてモデル化できる。このように曲がる部分を限定することで、全関節の回転の総和に対して頭部の変位が最大化され、効率的なマニピュレーションを実現していることが指摘されている [6]。本稿ではこれらの運動について着目する。

2.2 骨格と靭帯

ダチョウの首の全長はおよそ 1.0 [m] である。各関節の長さは、頭側にかけて短くなる傾向があり、先細り構造である。また、骨格と靭帯の構造により可動域が制限されており、関節ごとに関節可動域は変化する。各関節の長さ (軸間距離) と Dorsoventral side の関節可動域を表 1 に示す。また、各関節の背部には発達した単関節の靭帯 (Ligamentum elasticum interlaminare) があり、首の自重を補償している [7]。

2.3 筋配置

矢状面上の首運動には腹側と背中側の筋が寄与する。腹側と背側の筋はそれぞれ筋骨格配置が異なる。背側には M. longus colli dorsalis pars cranials、M. longus colli dorsalis pars caudalis、M. longus colli dorsalis pars profunda などの長筋がある。これらは腱を介して首を駆動している。また、深部には単関節筋である Intervertebral-system が配置している [8]。この Intervertebral-system は関節の剛性の調節などの役割を持つと推測される [9]。一方、腹側には M. longus colli ventralis が配置している。M. longus colli ventralis は 5 つの関節おきに腱が配置しており、このモジュールが 1 つの関節おきに繰り返し構造を持っている (図 3)。

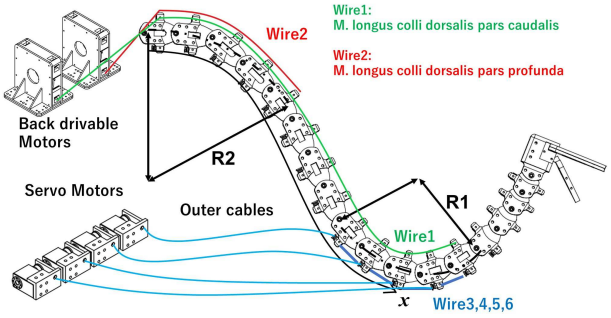

Fig.5 Wire positions in the manipulator

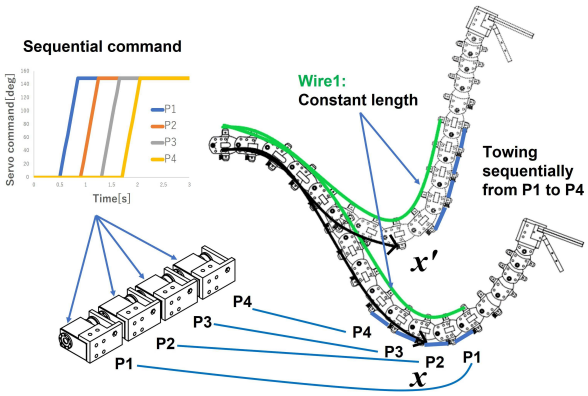

Fig.6 Motion of center of curvature

3 マニピュレータへの実装

3.1 骨格と靭帯

頸椎はナイロン焼結品を用いて実装した。各頸椎はベアリングでつながれており、滑らかに運動する（図 4-(a)）。関節ごとの設計パラメータは軸間距離と関節可動域であり、実際のダチョウのものと同じく表 1 に準じた。関節可動域はナイロン製のタイバンドによって長さの制約をつけることで実現した。背側にはセラミック製のブッシュを用いており、腱を模したワイヤとの摩擦を減らすことが出来る。また、側面に Intervertebral-system の模倣としてピアノ線 (d=1.2 [mm]) を 5 本束ねたものを配置した (図 4-(b))。C18 から C11 関節の背側には輪ゴムにより張力を作用させ、Ligamentum elasticum interlaminare を模倣した (図 4-(c))。

3.2 筋配置の実装

ダチョウの首を駆動する筋と頸椎を接続する腱の模倣として高強度ポリエチレン繊維ワイヤ (Dyneema ULTRA2 No.15) を用いた。図 3 において、頭側の長筋 M. longus colli dorsalis pars cranials は, 主に頭部の駆動に寄与する [9] ため、着目する矢状面上の運動には、背側の M. longus colli dorsalis pars caudalis、M. longus colli dorsalis pars profunda、および腹側の M. longus colli ventralis が寄与

Table 1 Parameters of ostrich neck manipulator

	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
dorsal angle limit [deg]	12	18	20	28	31	32	32	28	29	30	28	22	21	19	18	18	18
ventral angle limit [deg]	12	18	18	25	30	32	30	26	22	18	13	12	8	5	5	5	5
length [mm]	32	33	41	47	52	53	54	56	58	62	61	62	61	64	66	61	53

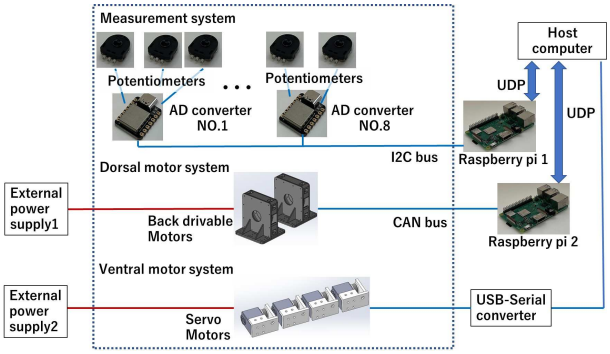

Fig.7 Ostrich manipulator architecture

すると考えられる。そこで、C6 に付着する M. longus colli dorsalis pars caudalis に対応して、C6 の背側にワイヤ 1 を固定し、ブッシュを介して背側に沿うように配置した。また、背側の M. longus colli dorsalis pars profunda に対応して、C14 の背側にワイヤ 2 を固定し、ワイヤ 1 と同様にブッシュを介して背側に沿うように配置した。ワイヤ 1 とワイヤ 2 は根元に配置された 2 つの低減速比モータ (T-motor AK80-6) を用いてけん引する。さらに、繰り返し構造を持つ腹側の筋である M. longus colli ventralis に対応して、C6 から C9 の関節の腹側に単関節筋として腱駆動機構を配置した。腱駆動機構において、ワイヤはアウターケーブルを介してプーリーに独立に接続されており、サーボモータ (DynamixelXM540-W150-R) によりけん引される (図 5)。

3.3 実装した筋配置による首運動の実現

3.2 節で示した筋配置によって Lever Pattern と Rolling Pattern を実現する方法を考える。Lever Pattern は 2 リンク系と同様の運動であるが、関節可動域は 50 [deg] 程度なので、複数の関節が一つの曲率円を構成していると考えられる。そこで図 5 に示すように、ワイヤ 1 が頭側の曲率円を、ワイヤ 2 が尾側の曲率円を形成すると解釈した。これらの曲率半径 R1、R2 を制御することで 2 リンクマニピュレータと同様の運動を実現する。

一方、Rolling Pattern は頭側の曲率中心の移動ととらえることが出来る。腹側に単関節筋として実装した腱駆動機構と、ワイヤ 1 の幾何学的な関係によって、この曲率中心の移動という機能を実現できる。背中側のワイヤ 1 の長さを一定にする位置制御の下、腹側の腱駆動機構を、定められたシーケンスに従って駆動すると、頭側が真直になった分、尾側で曲率円が現れ、結果として曲率円の中心 x が尾側に移動する (図 6)。

このように動物の多自由度な身体を曲線に近似し、その曲率半径と曲率中心の移動としてとらえる考え方はタコ [11] やヘビ [10] の運動の理解に適用されており、さらなる多自由度化や、3 次元運動の解析への応用が期待できる。

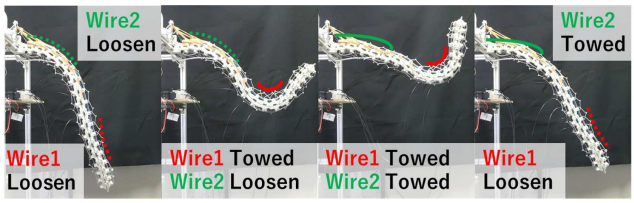

Fig.8 Lever Pattern

3.4 システムの構成

ダチョウ首規範マニピュレータは、背側、腹側の駆動系と関節角度計測系に分かれている (図 7)。駆動系に関しては、背側の低減速比モータは Raspberry pi を介してホストコンピュータと通信している。また腹側のサーボモータは、USB-シリアルコンバータを介してホストコンピュータに接続されている。関節角度計測系に関しては、17 個の関節にポテンショメータ (RDC503052A) を配置し、2 つの関節おきに配置された Seeeduino xiao により AD 変換する。このデジタル信号を I2C 通信により送信することで 4 本の配線で首の運動を阻害することなく関節角度を計測できる。

4 矢状面上の運動実験

本章の実験では、ワイヤの耐久性及び実験の安全性の観点から、質量 170 [g] の頭部を外して検証した。

4.1 Lever Pattern

図 8 に示すように、C6 に付着するワイヤ 1 と C14 に付着するワイヤ 2 をそれぞれけん引することにより、曲率半径 R1 と曲率半径 R2 を制御することで、2 か所の回転中心をもつ 2 リンク系と同様の運動を実現した。

4.2 Rolling Pattern

Rolling Pattern は首を挙上する動作であるので、腹側と背側の協調が重要である。3.2 節で述べたように、背側の筋の長さを一定に保ちつつ、腹側のサーボモータを順次けん引することで、Rolling Pattern を実現した。また、C14 に付着するワイヤ 2 をけん引することで、首を地面に対して鉛直に持ち上げられることを確かめた (図 9)。また、図 10 にサーボモータを順次けん引しているときの各関節角度の時系列を示す。赤丸部に着目すると、受動関節 (図 10-(a)) と、能動関節 (図 10-(b)) について、回転運動の位相が、尾側の関節ほど遅れていることがわかる。このことから、決められたシーケンスで駆動される関節のみならず、非駆動

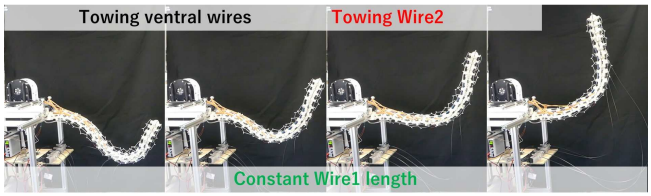

Fig.9 Rolling Pattern

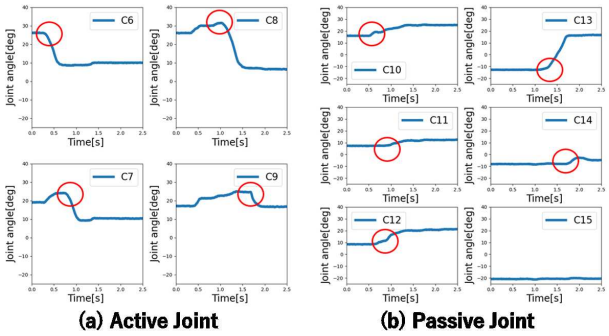

Fig.10 Joint angle during the Rolling Pattern

関節も、背側における長さに関する制約によりシーケンスが生まれ、首全体の Rolling Pattern が生まれているといえる。

4.3 考察

ダチョウの首のような非常に多自由度なシステムをリアルタイムで制御するのは難しい。このような運動自由度の問題に対して、生物は筋シナジーと呼ばれる筋の協調により自由度を削減していると考えられている [12]。鳥類の首の矢状面上の運動時においては、これまで筋電位を用いた研究により腹部と背部の筋の協調が確かめられている [13]。しかし、筋の協調がどのような意味を持つのかという問いに対しては、このような分析的な手法では理解することが難しい。本稿ではロボットにおいて腹部、背部がそれぞれ単純な位置制御のみで首の運動を作り出すことが出来ることを示した点で、生物における冗長な自由度に対する問題に示唆を与えるものであると考えている。

5 結言

本稿では、ダチョウ首の解剖学に基づいた多自由度マニピュレータを制作し、ダチョウと同様の矢状面上の運動ができることを確かめた。また実装を通して、鳥類の首の挙上動作について、背側の筋により幾何学的な拘束を与えることで実現されている可能性を指摘した。今後はロボットを漸次的に複雑化し、多様な動作を実現していく。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費、新学術領域「ソフトロボット学」JP18H05466 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] K. Hsiao and H. Mochiyama, ”A wire-driven continuum manipulator model without assuming shape curvature constancy” 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017, pp. 436-443.

[2] Hannan MW, Walker ID. ”Kinematics and the implementation of an elephant’s trunk manipulator and other continuum style robots”. J Robot Syst. 2003 Feb;20(2):45-63

[3] 荒井 裕彦 「非駆動関節を有するマニピュレータの動力学的干渉による位置制御」, 計測自動制御学会論文集, 25 巻, 9 号, p. 1012-1017, 1989.

[4] 鈴木 高宏, 三好 渉, 中村 仁彦, 「非ホロノミック自由関節マニピュレータの制御」, 日本ロボット学会誌, 2001, 19 巻, 4 号, p. 499-509

[5] Zweers,G.A.,Van Der Leeuw,A.H.,Bout,R.G.,”Evolutionary Morphology of the Neck System in Ratites, Fowl and Waterfowl”, Netherlands Journal of Zoology, 51(2), 243-262,2001.

[6] Zweers, G.and Bout, R.and Heidweiller, J.,”Motor Organization of the Avian Head-Neck System”,Perception and Motor Control in Birds: An Ecological Approach, Springer Berlin Heidelberg,201–221,1994

[7] Dzemski G, Christian A.,”Flexibility along the neck of the ostrich (Struthio camelus) and consequences for the reconstruction of dinosaurs with extreme neck length. ”,J Morphol. 2007 Aug;268(8):701-14.

[8] Böhmer, Christine and Prevoteau, Jocerand and Duriez, Olivier and Abourachid, Anick, ”Gulper, ripper and scrapper: anatomy of the neck in three species of vultures,Journal of Anatomy”, vol 236,4,701-723,2020

[9] 伊藤 宏司, 辻 敏夫, 「生体運動系の冗長自由度とインピーダンス調節」, バイオメカニズム, 1992, 11 巻, p. 223-233.

[10] 森 淳, 山田 浩也, 広瀬 茂男, 「三次元索状能動体 ACM-R3 の設計開発とその基本操舵制御」, 日本ロボット学会誌, 2005, 23 巻, 7 号, p. 886-897

[11] Sumbre G, Gutfreund Y, Fiorito G, Flash T, Hochner B.,”Control of octopus arm extension by a peripheral motor program”. Science. 2001 Sep 7;293(5536):1845-8

[12] Nicholai A. Bernstein, 工藤 和俊訳,「デクステリティ 巧みさとその発達」(Dexterity and Its Development), 金子書房,2003

[13] Angelique H. J. van der Leeuw, Ron G. Bout, Gart A. Zweers, ”Control of the Cranio-Cervical System During Feeding in Birds”, American Zoologist, Volume 41, Issue 6, December 2001, Pages 1352–1363,