腱駆動モジュールによる脊椎ロボットの協調制御

○須藤 陸（ 神奈川工科大学） 三枝 亮（ 神奈川工科大学）

The spine plays various roles such as body support, securing the range of motion, and protecting the central nervous system. The development of robots with spine has been reported. However, these studies have focused on mimicking animals, and the engineering design of spine can be improved for further investigation. In this study, we focus on the flexibility, robustness, and extensibility of the spine structure, and aim to develop a modularized spinal robot that incorporates these properties. Experimental results showed that the posture of spinal module could be controlled successfully using tendon drive and sensor fusion.

1. はじめに

脊椎には，身体の支持，可動域の確保，中枢神経の保護といった様々な役割があり，この構造により柔軟性と堅牢性を併せ持った脊椎動物は，多様な進化と生存戦略により地球上のあらゆる環境に適応してきた．脊椎構造は柔軟性，堅牢性に加え，多様な進化を許容する拡張性を備えており，本研究ではこの構造をロボットに取り入れることで，柔軟性，堅牢性，拡張性を併せ持つロボットの開発を目指す．脊椎構造を持ったロボットとしては，人型 [1][2]，4 脚型 [3]，サンショウウオ型 [4] などの研究が報告されている．しかしこれらの研究は生物模倣に重点を置いており，脊椎構造を工学的に再構成する手段には検討の余地がある．例えば椎骨の持つ繰り返し構造についてはこれまで重視されておらず，脊椎構造をモジュールの連結によって再構成することで様々な用途に応用可能なロボットが実現する可能性がある．本研究では計測，駆動，制御を内蔵した単一のモジュールを製作し，それらの連結や分離によって多様な脊椎の再現を目指す．

2. 脊椎構造

2.1 脊椎構造の再現

脊椎構造を人工的に再現するにあたって，必要な要素を「骨格」「椎間板」「筋」「神経」とした．骨格は形状を維持する構造材，椎間板はクッション性のある可動部，筋は動きを生み出す動力，そして神経はこれらを動作させる制御系である．以上の 4 要素をロボットの構造として，それぞれ ABS 樹脂，引きバネ，モータによる腱駆動，CAN バスラインに置き換える事とした．脊椎の要素とロボットとの対応を図 1 に示す．ロボットの設計にあたり，脊椎を椎骨と椎間板で構成された関節の繰り返し構造として解釈し，1 関節分の骨格· 椎間板· 筋を 1 つのモジュールとして設計した．モジュールには制御と通信を担うマイコンボードを搭載し，モータ· センサの制御と CAN 通信によるモジュール間での相互通信が可能である．また，モジュールを構成する部品のうち，骨格パーツとマイコンボード用の基板は研究室内の機材で製造できるように設計し，他は全て汎用品を使用した．これらの仕様により，ロボット全体の組み立てや関節数の変更などを容易に行うことができるだけでなく，使用する部品の変更やモータ· センサの追加といったモジュール単体の改良にも容易かつ迅速に対応できる．なお，少ないモジュール数でも良好な結果を得るため，1 関節あたりのピッチ· ヨー軸の可動域は実際の脊椎よりも大きくなるよう設計した．また，現段階では構造の簡略化のためロール軸の回転関節は実装していない．製作したロボットの腱駆動モジュールを図 2 に示す．

脊椎要素	対応部材
骨格	ABS樹脂
椎間板	引きバネ
筋	腱駆動（モータ・ワイヤ）
神経	CANバスライン

図 1 脊椎ロボットの構成要素

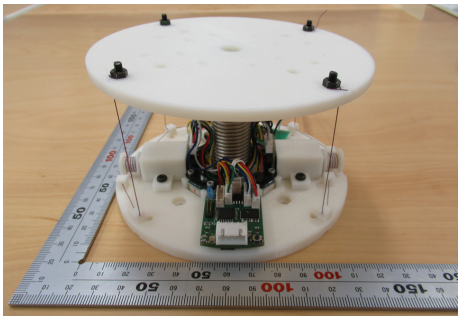


図 2 製作した腱駆動モジュール

2.2 腱駆動機構

前述したとおり，モジュールはピッチ軸とヨー軸の 2 つの可動域を持ち，それぞれの軸を 2 つのモータで牽引することで駆動している．牽引機構はモータ，プーリ，ワイヤによって構成されている．モータは汎用の小型ギアードモータ，プーリは ABS 樹脂による 3D プリント，ワイヤは金属製の釣り糸を使用した．この機構を図 3 のように 2 基配置し，2 自由度を実現している．モジュールのピッチ軸· ヨー軸の動作は 2 つの牽引機構の協働によって生み出され，例えば図 4 に示すように，2 つのモータを同じ方向へ回転させればピッチ軸方向の動きに，互い違いに回転させればヨー軸方向の動きとなる．

3. 動作実験

3.1 単体動作

製作したロボットについて，モジュール単体の動作を確認するため 2 種の実験を行った．一方はピッチ·

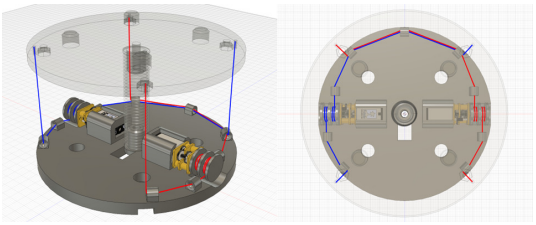


図 3　機構模式図

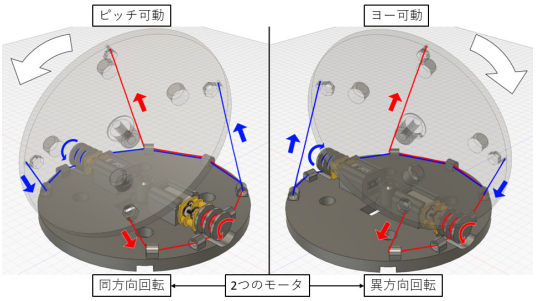


図 4　モジュールの単体動作

ヨー軸の可動域テスト，他方は 9 軸 IMU を用いた姿勢制御テストである．図 5 にピッチ・ヨー可動域テストの様子を示す．画像上段がピッチ，下段がヨーである．このテストではピッチ・ヨーどちらも最大 60[deg] 程度までの動作を確認できた．

姿勢制御テストは，モジュール上部に Bosch 社製 9 軸 IMU BNO055 を搭載して行う．この IMU から出力されるクォータニオンをオイラー角に変換してモジュールの姿勢角度を取得する．姿勢制御テストの様子を図 6 に示す．

姿勢制御テストでは，センサ情報から算出した軸の傾き θ_i から u_0，$-u_0$，0 のいずれかの指令値 u_i を決定し，その指令値をもとにモータを回転させて自己の姿勢を基準角度 $\theta_0 \pm a$ へ制御する．u_0 は事前に設定した指令値に代入する値，a は許容誤差であり，どちらも正の値である．指令値はモータの回転方向を表しており，それぞれ正転，逆転，停止に対応している．算出した傾きと指令値はシリアル通信により取得できる．以下に指令値決定の式を示す．

$$u_i = \begin{cases} -u_0 : (\theta_i - \theta_0 > a) \\ 0 : (|\theta_i - \theta_0| \leq a) \\ u_0 : (\theta_i - \theta_0 < -a) \end{cases} \quad (1)$$

$$i = 1, 2\ ,\ u_0 > 0\ ,\ a > 0$$

ロボットには図 6 左側に示すように，制御の様子を視認するためのカメラを取り付けた．このカメラによって，外部からだけでなく，ロボットの主観的な視点でも動作を確認できる．

これらの準備を行ったうえで，ロボットを載せた土台を人為的に傾け，制御の有無で姿勢と出力される傾き・指令値がどう変化するかを観察，記録した．図 7 にその結果を示す．なお，実験時の操作について，傾きの方向や速度は同じになるように心掛けたが，手操作のため完全に同一とはなっていない．

図 7 の結果は，オレンジのグラフが角度の時間変化を，青色のグラフは姿勢制御時にモジュールが出力した指令値を表す．姿勢制御を行わない状態では土台の傾きと一体となって全体が傾くため，ピッチ軸，ヨー軸どちらも最大 30[deg] 程度まで傾いている．しかし，姿勢制御を行った場合には傾いた方向に合わせてその傾きを打ち消す方向に指令値が決定され，姿勢が制御された結果傾きが 10[deg] 以下に抑制されていることがわかる．

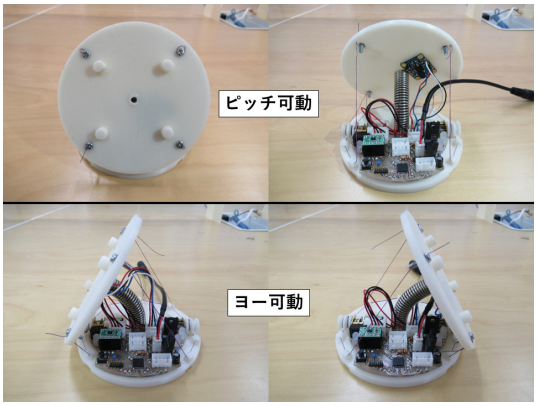


図 5　モジュール可動域

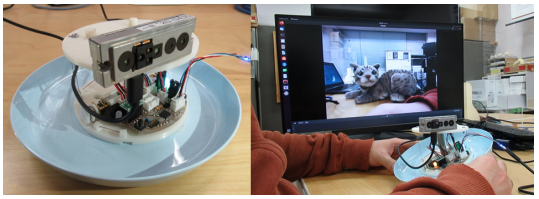


図 6　姿勢制御テストの様子

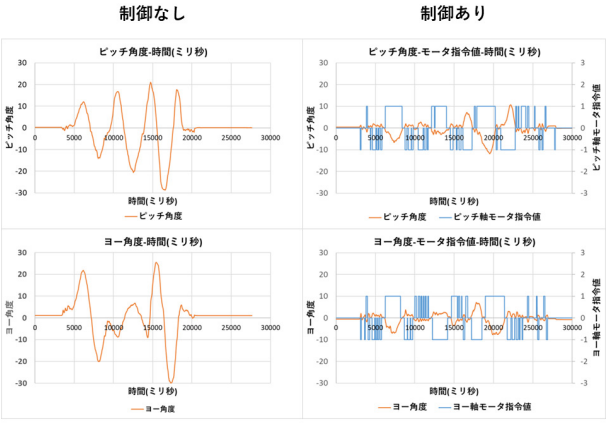


図 7　姿勢制御テストの結果

今回のテストでは，傾き時の角速度が 20[deg/s] 程度まででであれば基準角度に正確に追従することができ，良好な結果を得ることができた．一方で，角速度が 20[deg/s] を超えるとモータの動作速度が追い付かなくなり，追従精度が低下した．この問題は，モータの変更や，複数のモジュールを連結して動作速度を加算することで対応可能だと考えられる．

3.2　連結動作

本モジュールは，前述した通り CAN バスラインを使った相互通信が可能である．そこで，通信のテストを

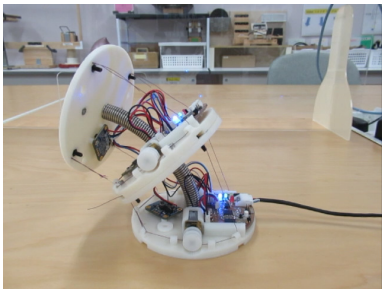


図 8　モジュールの連結動作

兼ねたモジュールの連結動作テストを行った．実験の流れとしては，まずシリアル通信を使い PC から任意のモジュールへアドレスと角度の指令値を送り，モジュール側で信号を処理してアドレスに対応したモジュールへ指令値を伝える．これにより上位側は任意のモジュールへアドレスと指令値のセットを送るだけで済む．図 8 にテストの様子を示す．

4.　モジュール角度の推定と制御

4.1　角度推定方法

本モジュールはバネでできた関節をワイヤで 2 方向にけん引する構造上，関節角度を直接取得することができない．9 軸 IMU を使ってワールド座標系に対する絶対角度を求めることはできるが，この方法でモジュール単位の相対角度を求めるには接続されたすべてのモジュールの絶対角度が必要になるため，膨大な通信量と煩雑な計算が必要になってしまう．そこで本研究では，エンコーダによるワイヤの送り長と，近接覚センサによる角度情報を併用してモジュール単位の相対角度を推定することにした．図 9 に搭載したセンサ類の配置を示す．

エンコーダは使用した DFROBOT 社製ギアードモータに搭載されており，DC モータ 1 回転あたり 28 カウントを出力する．ギアの減速比は 380:1 を選定したため，ギアードモータの出力軸 1 回転あたり 10640 カウントの分解能で回転角度を検出する．回転角度からワイヤの送り長を算出することでモジュールの角度変化を求めることができる．エンコーダによるモジュール角度の推定は以下の式で表される．

$$\theta_{Eraw} = 2\arcsin(l/d_w) \tag{2}$$

θ_{Eraw} はエンコーダによるモジュール角度推定値，l はワイヤ送り長，d_w はワイヤ取り付け位置間の距離である．

近接覚センサは，測距センサを複数組み合わせて作成した．使用した測距センサは ToF(Time of Flight) と呼ばれる測定方式を採用しており，これは光の飛行時間を測定することで距離を算出する方式のため，測定対象との相対角度が変化しても高精度かつ安定した距離の測定が可能である．この測距センサをモジュール下部に 4 つ，90[deg] の間隔で円周上に配置し，それぞれのモジュール上面との距離情報を比較することで姿勢角度を求める．近接覚センサによるモジュール角度の推定は以下の式で表される．

$$\theta_{Praw} = \arctan\{(r_j - r_{j+2})/d_p\} \quad j = 0, 1 \tag{3}$$

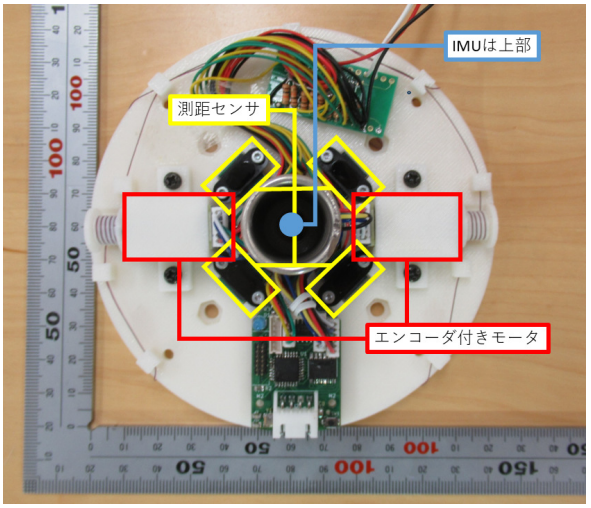


図 9　センサ類の配置

θ_{Praw} は近接覚センサによるモジュール角度推定値，r は測距センサの距離情報，d_p は対角にある測距センサ間の距離である．

エンコーダと近接覚センサにはそれぞれ利点と欠点がある．エンコーダはワイヤの送り長を正確に算出できるが，初期姿勢からの相対的な値しか計測できないため，別の方法で初期姿勢を取得する必要がある．また，ワイヤの伸びや機械的な遊びによる誤差，ワイヤ破断等の影響により常に正確な値が取得できるとは限らない．近接覚センサは機械的要素に頼らず角度の計測ができるが，測距センサ自体の精度や出力値の揺れ，マイコンの計算誤差により，計測精度に不安が残る．また，測距センサの光路が遮られた場合は正確な角度を取得できない．本研究ではこれら二つの手法を組み合わせることで，互いの欠点を補い，より正確な角度を求める．

4.2　角度の補正と制御

エンコーダと近接覚センサの 2 種のセンサを用いて，モジュール動作時の姿勢角度を求める実験を行った．実験では IMU の計測値を真値としてエンコーダと近接覚センサそれぞれの推定した角度の補正を行い，補正結果に基づいて IMU の計測値を使用せずに角度制御を行った．

4.2.1　角度推定値の補正

図 10 に各センサによる角度推定値の補正結果を示す．なお本実験では，簡単のため片側のモータのみを使用し，斜め方向の傾きの制御を行った．各センサの推定値補正方法を以下に記す．

エンコーダ推定値については補正なしでも十分に正確な相対角度を取得することができたため，補正は IMU による初期姿勢を加えるのみとした．これにより IMU とほぼ同じ値を取得することができたため，初期姿勢が取得できればエンコーダによって正確な角度制御が行えることが分かった．

近接覚センサ推定値については，測距センサの仕様に起因する出力の揺らぎが生じていた．そこで，角度計測時には計測時点から遡って 10 回分の推定値を平均して値の平滑化を行い，その上で補正値を算出した．

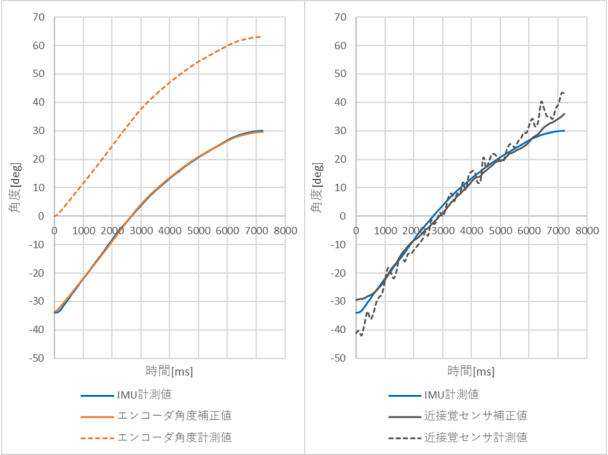


図 10　エンコーダ，近接覚センサ補正結果

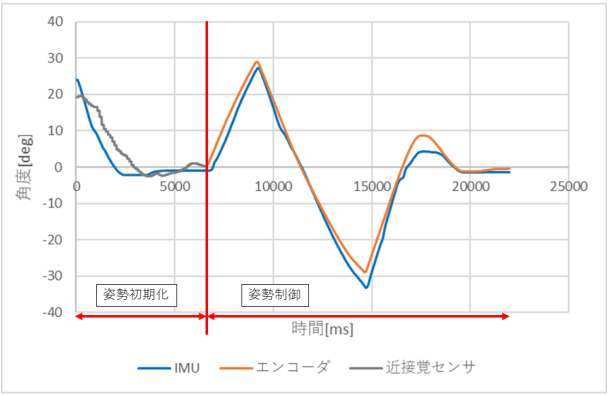


図 11　近接覚センサとエンコーダによる角度制御

補正値算出のための係数とオフセット値は，IMUとの誤差が最も小さくなる値を最小 2 乗法を用いて求めた．エンコーダ，近接覚センサそれぞれの補正方法は以下の式で表される．

$$\theta_E = \theta_{Eraw} + \theta_{init} \tag{4}$$

$$\theta_P = \alpha\theta_{Pavr} + \beta \tag{5}$$

θ_E と θ_{Eraw} はそれぞれエンコーダによる角度の補正値と推定値，θ_{init} は初期姿勢の角度である．また，θ_P，θ_{Pavr} はそれぞれ近接覚センサの補正値と 10 回分推定した値の平均，α と β は最小 2 乗法で求めた係数とオフセット値である．

4.2.2　補正値による角度制御

補正したセンサの値を用いて角度制御実験を行った．図 11 に制御結果を示す．制御に使用したのはエンコーダと近接覚センサのみであり，IMU の値は比較のため示す．制御においてはまず近接覚センサを用いてモジュールを初期姿勢に移行し，その後エンコーダを使って角度を取得する．IMU の値と比較すると，エンコーダによる制御は正確にできているが，近接覚センサによって取得した初期値に起因するずれが生じていることが分かった．実験時の IMU とのずれは最大で 5[deg] 程度であった．また，傾きが大きい時や，短時間で大きく傾きを変えた時にずれが大きくなる傾向が見られた．これは，モジュールのバネ関節の曲がり方が線形でないことや，ワイヤとガイドとの摩擦による誤差であると考えられる．

5.　結言

5.1　まとめ

本論文では，ロボットの柔軟性，堅牢性，拡張性を向上するために，脊椎動物の筋骨格構造を設計に取り入れることを提案し，実際にロボットを製作した．脊椎構造を人工的に再現するにあたって，必要な要素を抽出し，それを置き換えるような設計を行った．また，組み立てや仕様変更を容易にするため脊椎要素のモジュール化を行い，協調動作のためモジュール間通信を実装した．加えて，製作したロボットを用いた実験によりこのロボットは広い可動域を持つことが示され，姿勢制御においても良好な結果が得られた．

IMU を用いた姿勢制御において，傾き時の角速度が 20[deg/s] 程度まででであれば基準角度に正確に追従することができたが，それを超えるとモータの動作速度が追いつかなくなり，追従精度が低下した．これはモジュール単体の最大動作速度が 20[deg/s] 程度であることを示すが，ロボットアーム等に応用することを考えると，現在の動作速度では遅い．また，センサ補正値を用いた IMU に依存しない角度制御においては，エンコーダによって相対角度を正確に求めることはできたが，近接覚センサによる初期姿勢の取得に課題があり，バネ関節の非線形性やワイヤの摩擦といったハードウェアに起因する課題も明らかになった．

5.2　今後の展望

今後は骨格パーツの設計を詰め，実際の運用に耐え得るよう摩擦の低減や強度の向上を行う．エンコーダと近接覚センサを併用したより高度な制御，例えばワイヤ破断の検出等も行いたいと考えている．また，モジュールの初期姿勢の取得についても一考の余地があり，例えば近接覚センサの精度は測距センサ間の距離を離すことで向上できると思われる．加えて，関節の非線形性に対してもソフトウェアの改良で対応する予定である．モジュールの連結に対応したソフトウェアの開発も進め，多数連結したモジュールの分散協調制御なども検討していきたい．

参　考　文　献

[1] 茂木 陽太郎，他 7 名: ”筋骨格ヒューマノイドにおける頸部筋群負荷を支持可能な剛性可変脊椎構造の開発”，日本ロボット学会誌，Vol.32，No.7，pp615-623，2014.

[2] 浅野 悠紀，他 10 名: ”実世界での環境接触動作に向けた人体模倣筋骨格ヒューマノイド腱悟郎の開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，2A1-13a2，2016.

[3] ”脊椎構造をもつ四脚ロボット　SQ43”，http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/spined_robots/sq43/sq43-j.html

[4] Tomislav H，et al.: ”Inverse kinematics and reflex based controller for body-limb coordination of a salamander-like robot walking on uneven terrain”，IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS)，pp. 195-201，2015.