ストランド筋駆動ヒューマノイドロボットの実現へ向けて

On the realization of a humanoid robot using Strand-Muscle Actuators

島津 尚子, 福島 さやか, 鈴木 昌和 (東海大学)

Naoko SHIMADU, Sayaka FUKUSHIMA, Masakazu SUZUKI, Tokai University

This work is concerned with a plan of realizing a humanoid robot driven by Strand-Muscle-Actuators (StMA). The StMA easily control joint angle/stiffness by antagonist muscles with nonlinear elastic properties and realize a multi-DOF joint by multiple mounting. Robot that uses the Strand-Muscle-Actuator has been made. In this article the mechanism of Strand-Muscle-Actuator-based Robots are introduced, and the realization plan of a humanoid robot that we connect the robots is described.

Key Words: Artificial muscle, humanoid robot

1 はじめに

脊椎動物の関節は収縮量および弾性係数の調節可能な筋肉を拮抗駆動することで、リンク角だけでなく剛性制御を容易に実現している。そこで、我々は脊椎動物の筋肉を模倣した人工筋としてストランド筋アクチュエータを提唱している [5]。これまでにストランド筋アクチュエータの駆動原理や力学的特性が解析され、人間の体の一部 (手, 肩, 膝, 足首) を模倣したロボットを試作し、ストランド筋アクチュエータの有用性を示してきた。5 指ロボットハンドではラケット把持を実現した。人間の上肢をモデルとし、冗長アクチュエータをもつ図 1 左のようなストランド筋型ロボットマニピレータ StMA-RArm (Strand-muscle-actuator-based Robot Arm) も実現されている [3]。また多脚歩行ロボットも製作され、アクチュエータの弾性特性を活用した効率的歩行も実現している [4][5]。さらに、人間と同じ二足歩行はそのまま生活環境に柔軟に対応でき、より幅広いニーズに応えることができるようになる事に着目し、図 1 右のような人間の 2 歳児程の大きさのストランド筋型二足歩行ロボット SORLs (Strand-muscle Orthograde Robot Legs) の開発を行い [2]、二足歩行の足がかりとして SORLs による片足立ち動作と足を 1 歩踏み出す動作を実現した。ストランド筋アクチュエータの有用性が示された今、これまでに製作されたロボットを組み合わせることにより人間のように柔軟関節を持ったヒューマノイドロボット製作の実現も不可能ではない。

Fig.1 Strand-muscle-actuator-based Robot Arm (left) and Strand-muscle Orthograde Robot Legs (right)

本報ではまずストランド筋アクチュエータを用いた関節機構と制御に触れ、SORLs, StMA-RArm および 5 指ハンドの機構とストランド筋を用いる利点、ストランド筋アクチュエータの筋協調について述べる。その後、これらを総合したストランド筋アクチュエータ駆動ヒューマノイドロボット実現への構想を述べる。

Fig.2 Strand-Muscle-Actuator-based hexapod robot [4][5]

2 ストランド筋アクチュエータ

2.1 駆動原理と制御手法

ストランド筋アクチュエータは自然長 L (無負荷無捻状態の筋長) の筋繊維 2 本 (ストランド筋) とモータで構成され (図 3(a)), ストランド筋の固定された一端 (駆動端) にモータでねじりモーメント τ_s を与えると、ねじり角 ϕ が生じ筋長が ℓ に収縮する。この時、移動可能な他端 (効果端) に変位 ξ を生じ、これを拘束すれば張力 T が生じる (図 3(b))。また、ストランド筋は一定張力が作用し効果端が収縮方向に自由な場合は ϕ を増加させれば弾性係数 E は小さくなるが、効果端が拘束された場合 ϕ の増加に伴って T が増加し、 E も大きくなる性質がある。

Fig.3 Strand-muscle actuator

2.2 関節角制御と関節剛性制御

本アクチュエータを図 4 のように 1 自由度関節に半径 R のプーリを介して拮抗配置すれば、 ϕ_i を調節することで駆動端から効果端への筋の経路長が変化し、任意のリンク角 θ が実現される。関節に拮抗配置したとき効果端は拘束されるので、前述のように ϕ_i を調節することで関節の剛性制御も可能となる。

筋 1, 筋 2 の自然長を等しくし、筋のねじり角を $\phi_1 = \phi_2$ としたときのリンク角を $\theta = 0$ とする。筋 2 の自然長でのリンク角を θ_0 とすると筋の収縮量 (効果端移動変位) $\xi_i(\phi_i, T)$, $i = 1, 2$ とリンク角 θ の関係は次式で表される。

$$\theta = \frac{\xi_1(\phi_1, T)}{R} - \theta_0 = -\frac{\xi_2(\phi_2, T)}{R} + \theta_0 \quad (1)$$

Fig.4 Robotic joint actuated by antagonistic Strand-muscle actuators

モータにはセンサレスの DC モータを使用している。 θ を制御するにはアクチュエータ毎に T に応じた適切な ϕ_i を与えて必要な ξ_i を実現しなければならないが、本アクチュエータは非線形弾性特性を有しているため複雑でモデル化は難しく $\xi_i(\phi_i, T)$ は実験式として得ている。また、本アクチュエータの特性はモータの性能、筋繊維の種類、自然長によって異なるため、アクチュエータを多数配置した多自由度関節や多関節で高度な作業を制御する場合、筋毎に T を測定し、これにより変化する目標ねじり角 ϕ をモータ駆動によってフィードバック制御で実現する方式は効率的とは言えない。そこでアクチュエータレベルでは実験式に基づく開ループ制御を行い、リンク先端位置等のみをフィードバックして目標動作を実現するモータ駆動パターンを学習する方式を採用する。[4]

3 脚と歩行

3.1 脚機構 SORLs

本節ではストランド筋アクチュエータを用いて製作されたストランド筋型二足歩行ロボット SORLs について、その機構とこれまで実現された片足立ち動作について述べる。[2] さらに SORLs に歩行を行わせるために新しく製作した足機構について解説する。

3.1.1 機構と運動学モデル

ストランド筋型二足歩行ロボット SORLs (Strand-muscle Orthograde Robot Legs) は、人間の可動範囲を参考にストランド筋アクチュエータを用い哺乳類の脚のメカニズムを取り入れて製作されている(図 5)。すなわち人間に近い骨格構造を実現し多数のストランド筋アクチュエータを脚部に搭載して、人間に近い機能を持った脚部の再現を目指すものである。

図 5 左に SORLs の概観を、図 5 右にその運動学モデルを示す。また各関節の可動範囲と駆動に用いるアクチュエータの対応を表 1 に示す。

- 股関節と上半身：各股関節は大きな可動範囲を得るためにストランド筋自然長を 380[mm] と長くしている。股関節を駆動するアクチュエータのモータは腰から 300[mm] 上方の位置に搭載してこれを錘として活用し、人間とほぼ同じ重心位置を実現している。また、人間の筋肉同様、アクチュエータの並列配置により筋繊維を束ねて大きな張力を実現している。各股関節は 2 自由度相当の関節を実現している。
- 膝関節：膝関節は 1 自由度で構造は単純だが、可動範囲を大きくする必要がある。半径 20[mm] のプーリを用いた拮抗構造として自然長 170[mm] の筋を用い、可動範囲 135[deg] を実現している。
- 足首関節：足首関節は外乱の影響を軽減し、複雑で柔軟な動きにも対応するため、ユニバーサルジョイントを組み込んで 2 自由度関節とし、ストランド筋アクチュエータを前後方向に 2 つずつ並列配置し横方向に 2 つ配置した高並列構造としている。

3.1.2 片足立ち動作

二足歩行を行なわせる上での基本的動作として片足立ち動作を行う。片足立ち動作をさせるためには、軸足を傾けることで重心

Fig.5 SORLs: Overview (left) and kinematic model (right)

Table.1 Specification for each joint

Joint	D.O.F.	Actuator	Movement range[deg]
J_{HR1}, J_{HL1}	1	$A_{H1} \sim A_{H12}$	$-40 \leq \theta_{x}^{HR}, \theta_{x}^{HL} \leq 40$
J_{HR2}, J_{HL2}	1	$A_{H13} \sim A_{H22}$	$-120 \leq \theta_{y}^{HR}, \theta_{y}^{HL} \leq 30$
J_{KR}, J_{KL}	1	$A_{K1} \sim A_{K8}$	$-0 \leq \theta_{y}^{KR}, \theta_{y}^{KL} \leq 135$
J_{AR}, J_{AL}	2	$A_{A1} \sim A_{A12}$	$-22 \leq \theta_{x}^{AR}, \theta_{x}^{AL} \leq 22$ $-30 \leq \theta_{y}^{AR}, \theta_{y}^{AL} \leq 16$

投影点を軸足の支持多角形内へと移動し(図 6(a))、もう一方を遊脚状態に移行する(図 6(b)) までの姿勢の安定性を確保する必要がある。

Fig.6 Standing on one foot motion of Robot model

始めに左右へ重心移動を行わせるが、ストランド筋の弾性や外乱を考慮に入れ、 y_G が軸足の足首より外側となるように $\alpha = 15[\text{deg}]$ とした。また、股関節アクチュエータのトルク不足が問題として考えられるので股関節にもアクチュエータを並列配置しトルク不足を解消しようと試みた。結果、SORLs の重心移動および片足遊脚状態を実現し(図 7)。さらに片足立ちから着床し脚部を一步踏み出す動作も可能とした。今後の課題として制御精度不足のため股関節が過負荷とならないようにアクチュエータ駆動パターンの再検討が挙げられる。

Fig.7 Standing-on-one-foot motion

3.2 足指と不整地歩行

SORLs による片足立ち動作は実現したが、現在の SORLs では足裏を 1 枚の平板を使用しているため、歩行の際の姿勢維持のための力が不足であるとともに、不整地における着床、姿勢維持が困難である。そこで足指を持つ新たな脚部、ストランド筋ロボット足 StMA-Foot1(Strand-Muscle-Actuator based Robot Foot1) の製作を行う。StMA-Foot1 の構造は、つま先側に 1 点、踵側に 2 点で支える 3 点支持とする。また、足首にユニバーサルジョイントを接続し、足首を屈折させるストランド筋アクチュエータは、人間の脛脛の位置に設置する。これは足部に設置するアクチュエータ数を減らし軽量化することにより人間に近い動作を可能にすることを目的としている。足指部にはストランド筋アクチュエータと板バネを拮抗に配置することにより着床の際のクッション、歩行の際の蹴り出しが可能となる。不整地における歩行は地形が既知だったとしても着床、姿勢維持において非常に細かな制御が必要である。しかし、StMA-Foot1 の足部分に弾性特性を有するストランド筋アクチュエータとバネを用いることによって制御面での負担とともに足部の故障確率も軽減が望める。

動作可動範囲は足首関節で脚部前方に 40[deg]、後方に 30[deg]、左右に 30[deg] となり、指関節で上方向に 15[deg]、下方向(親指のみ)に 30[deg] となり(図 8)、目標動作可動範囲を得ることができている。今後の課題としてジャイロセンサを搭載することによる不整地における姿勢維持制御を行うことを目標とする。

Fig.8 Movement of StMA-Foot1

4 ハンド・アームと筋協調

4.1 腕機構 StMA-RArm

ストランド筋型ロボットアーム (Strand-Muscle-Actuator-based Robot Arm) は人間の肩から手にかけての機構を模倣したロボットマニピュレータである (Fig.9)。上腕部で 12 個、肘部で 2 個、前腕からハンド部では 4 個の計 18 個のストランド筋アクチュエータを搭載している。関節の構成は球面ジョイントを用い肩に相当する 3 自由度の Joint 1、1 自由度の Joint 2、肘部に相当する 1 自由度の Joint 3、手首に相当する 1 自由度を持つ Joint 4 とその先のハンド部からなる (表 2)。肩は Joint 1、2 の併用により動作範囲を広くしている。ハンド部は軽量化のため 4 本の指に対し 3 個のアクチュエータを用い、Finger 3、4 を一つのアクチュエータで動作させるが、アクチュエータの弾性特性により物体の把持性能に大きな支障は無い。基本姿勢は、Fig.9 左のようにアームを鉛直下向きにしたときである。関節駆動範囲は表 2 に示す通りだが駆動端や効果端の設定、筋繊維の特性により前後する。大きさは 215W×194T×465H[mm]、重量約 2.3[kg](制御回路、計算機、電源を除く)である。定格出力 0.7[W] 及び 0.4[W] の DC ギャードモータを用い、筋繊維には直径 0.5[mm] の PE ライン (編込ポリエステル系合成繊維) を使用している。

本マニピュレータは、ストランド筋アクチュエータの高並列装着により幅広い関節剛性の調節を目指しており Joint 1 では 3 自由度関節に対しアクチュエータを 7 個、Joint 2 では 1 自由度関節に対し 5 個のアクチュエータを備えている (Fig.9)。このように Joint 1、Joint 2 では冗長筋を持つ構成となっている。

Fig.9 Structure of StMA-RArm

Table.2 Specification for each joints

Joint name	D.O.F.	Actuator	Movement range[deg]
Joint 1	3	$A_{11} \sim A_{17}$	$0 \leq \theta_{1X} \leq 65$
			$-40 \leq \theta_{1Y} \leq 40$
			$-50 \leq \theta_{1Z} \leq 50$
Joint 2	1	$A_{21} \sim A_{25}$	$0 \leq \theta_{2X} \leq 45$
Joint 3	1	A_{31}, A_{32}	$0 \leq \theta_{3Y} \leq 70$
Joint 4	1	A_{41}	$-25 \leq \theta_{4X} \leq 38$
Finger 1	1	A_1	$0 \leq \phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13} \leq 90$
Finger 2	1	A_2	$0 \leq \phi_{21}, \phi_{22}, \phi_{23} \leq 90$
Finger 3, 4	1	A_3	$0 \leq \phi_{31}, \phi_{32}, \phi_{33} \leq 90$
			$0 \leq \phi_{41}, \phi_{42}, \phi_{43} \leq 90$

4.2 5 指ハンド StMAH-Mini

これまでに 5 指ロボットハンドを製作し、ボールピンチング、卓球ラケット把持などの動作を実現してきた。新たな課題として、機構が簡素なためロボットの軽量化と小型化が可能というストランド筋アクチュエータの特徴を活かし、ハンドの性能を落とすことなく小型化を目指す。小型化した 5 指ハンド StMAH-Mini(Strand-Muscle-Actuator-based Robot Hand Mini) は指関節において第 1、第 2 を 1 自由度、第 3 関節を 2 自由度としている。全長 380[mm]、重量 455[g] となっている。親指を除く 4 指には屈曲動作を行う関節にストランド筋アクチュエータとバネを拮抗配置 (図 10) し、横方向の傾斜動作にはストランド筋アクチュエータ同士、もしくはストランド筋アクチュエータと弾性体を拮抗配置する事で動作実現を行っている。アクチュエータ配置は 2 段構造にし、上部に筋収縮量が少なくても動作可能な手首と親指の第 4 関節を制御するアクチュエータを、下部に指関節を屈曲伸展、横方向への傾斜動作を行わせるアクチュエータと、計 17 個のアクチュエータを設置する。製作したハンドはストランド筋アクチュエータと弾性体により小型化に成功し、さらに指関節の屈曲・伸展動作、親指関節の内転・外転動作などほぼ人間の手の動きを再現することに成功している。

4.3 冗長筋肩関節の筋協調制御

StMA-RArm の肩部はボールジョイントを用いた 3 自由度関節 (Joint 1) と 1 自由度関節 (Joint 2) からなり、Joint 1 ではアクチュエータを 7 個、高並列に配置しているため運動自由度に対し冗長なアクチュエータを備えている。冗長筋の活用による関節剛性調節範囲の拡大と筋破断時の動作保証が目的であるが、冗長なアクチュエータが複数存在するために関節を駆動させる際の筋張力の組み合わせパターンが無限に存在してしまう。そこで筋

Fig.10 Mechanism of StMAH-Mini

協調制御の最適化手法として Vi-PSO(Vibrant Particle Swarm Optimization)を用いる。

PSOは、探索範囲内に多数のエージェント(探索点)を配置し、各探索点において

- 更新対象エージェントの前の移動速度ベクトル
- 更新対象エージェント自身の目的関数値が最も良かったときの座標
- 全エージェントにおいて目的関数値が最も良かった時の座標

の3つの情報を利用してエージェントの移動を行うことで最適化を行っている。しかし、求める筋張力の組み合わせは時々刻々と変化するので PSO で最適化を行うと探索点が収束してしまうため、解決するために移動ベクトルを加え、時変関数最適化の実現を目指したものが Vi-PSO である。Vi-PSO を使い、適切な目標筋張力 T を求め、実機に適用した結果、肩関節を $-15[\text{deg}] \sim 15[\text{deg}]$ まで連続的に変化させる動作の実現に成功した [1]。

5 ヒューマノイドと行動学習

5.1 ヒューマノイド化構想

これまで人間のような柔軟で複雑な動作をロボットに行わせる事を目標とし、そのためにはロボットに人間に近い機構を持たせることが有効であると考え、特性や配置の可能性として人間の筋肉を模倣したストランド筋アクチュエータを提案し、人間の部分的な箇所を製作、アクチュエータを適用し基本となる動作を実現してきた。前節までに紹介したこれらのロボットを接続するには、機構面での強度や重量による重心位置の変動などの問題点はあるが、これを改善し組み合わせる事で人間に近い機構のヒューマノイドロボットの実現が可能であると考え。

2歳児の身長約 900[mm] を目標とし、アクチュエータ数を 106、自由度は下半身で 12、腕部で 8、手部で 16 の 36 自由度を目指している。これが実現すれば老人ホームや精神科病棟でのアニマルセラピーのような役割も可能であると考え。

ストランド筋アクチュエータを用いることの利点としてロボットに柔軟関節の実現が可能となる。これにより例えばロボットが人間と接触した際に人間への外傷が防げ、さらに衝撃吸収によりロボット自身の耐故障性の向上ものぞめ、不整地作業などの未知の環境に対しても対応可能である。また、機構が簡素なため、ロ

ボットの性能を落とすことなく小型化することが可能であるため頭部の製作には非常に有用である。人間の顔面部には 20 を超える筋肉が密集しておりこれらは表情筋といい人間の感情を微細な表情に表す役目をしている。この表情筋をストランド筋アクチュエータで再現することにより、骨格バランスを崩すことなくロボットに表情を与えることが可能となる。つまり、人間との共存を可能とし娯楽や介護・家事用として活用でき、さらには災害救助や地質・環境調査など人間が立ち入るには危険な環境でも活動が可能となる。

5.2 知的合成動作制御法による行動生成

5.1 節は機構面での話である。より人間に近い動作を行わせるためには、未知の状況においてもロボットが自律的に状況を判断して知能化できるような制御手法が必要である。そこで、ロボット知能化方法論として知的合成動作制御法(ICMC, Intelligent Composite Motion Control)[6]を提唱している。

5.2.1 知的合成動作制御法

人間の行動進化について見てみると単純な動作を組み合わせる事で複雑な動作を実現できる。また動作を繰り返し練習する事で器用な動作を実現できるとみなす事ができる。この人間の行動進化過程を模倣しロボットに応用したのが ICMC である。ICMC において運動学的・力学的視点で解析を行うことなくロボットに単純な動作さえ教えれば自律的・適応的に複雑で器用な動作を実現する事ができる。

5.2.2 知識アレイネットワーク

ICMC での行動進化を実現するために知識アレイネットワーク(Knowledge Array Network)を用いる。知識アレイ [6] とは動作を最適に実行するために必要な制御パラメータを保存してあるデータベースの事である。この知識アレイを各要素動作毎に作成し配置したものが知識アレイネットワークである。知識アレイネットワークが構成されていれば、目的動作の知識アレイに動作パラメータを入力するだけで目的の動作を実行する事ができるようになる。

6 終わりに

本報ではストランド筋アクチュエータを用いたヒューマノイドロボットの開発について、各部位の機構、これまでに実現した動作、および制御手法について報告した。今後、ヒューマノイドロボットの実現を行うにあたって、これまでに製作されたロボットの接続、人間の動作における動力学解析が必要である。また、より人間に近い動作を行わせるための制御規範として知的合成動作制御法の適用方法の模索と知識アレイの構成のためのデータ(動作に必要な関節回転角など)収集も課題として挙げられる。

参考文献

- [1] 馬谷原, 鈴木: Vibrant PSO による時変目的関数の最適化とその多自由度ロボット関節制御への応用, 電気学会電子・情報・システム部門大会'07, 2007
- [2] 宇野, 井筒: ストランド筋型二足歩行ロボットの開発, ロボティクスメカトロニクス講演会'06, 2007
- [3] 守谷, 宇野, 井筒: 冗長筋の最適協調制御法, ロボティクスメカトロニクス講演会'06, 2006, CD-ROM, 1P1-B21
- [4] 市川, 菊川, 中野, 鈴木: ストランド筋アクチュエータを用いた歩行ロボット, ロボティクスメカトロニクス講演会'03, 2003, 2A1-1F-A7
- [5] M.Suzuki, A.Ichikawa: Toward springy robot walk using Strand-muscle actuators, Proc. 7th Int. Conf. Climbing & Walking Robots, Madrid, 2004, pp.467-474
- [6] M.Suzuki, K.-U.Scholl, R.Dillmann: A method for learning complex and dexterous behaviors through knowledge array network, Proc. IROS 2001, 2001, pp.532-538