ベルト状プーリの近似モデルを用いた 1リンク腱駆動ロボットの順運動学*

名切 大*¹, 中村 豪*², 木野 仁*³

Forward Kinematics of One-Link Tendon Robot Using Approximate Models of a Belt-Formed Pulley

Dai NAKIRI*⁴, Tsuyoshi NAKAMURA and Hitoshi KINO

*⁴ Doctor's Program, Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology,
3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295 Japan

The control of joint stiffness of a robot is extremely important to guarantee safe and dexterous motion, especially for the collaborative operation between a human and a robot. Some devices to vary the joint stiffness have been proposed for a tendon-manipulator so far. However, the previous devices have problems such as a complex structure, increase of friction, increase of inertia and so on. In order to overcome these problems, we proposed a belt-formed pulley to vary the joint stiffness. Inserting the belt-formed pulleys into routes of wires, the joint stiffness of a tendon-driven robot can be varied depending on internal force among wires. The system using belt-formed pulleys has many advantages such as a simple structure, low friction, lightness in weight and low cost. However, little is known about kinematic issues of the tendon-manipulator using belt-formed pulleys. In this paper, we propose a numerical solving method of forward kinematics (to obtain joint angles from wire length) using approximate models of a belt-formed pulley. First, we propose three approximate models of a belt-formed pulley, and investigate usefulness of each model. Secondly, we present the numerical solving method of forward kinematics for a 1-DOF manipulator. Lastly, the usefulness of the proposed method is demonstrated through experimental result.

Key Words: Flexible Structure, Manipulator, Muscle and Skeleton, Kinematics, Tendon, Wire

1 はじめに

人間などの脊椎動物は筋肉を収縮させ腱を引張ることにより、関節を駆動させる。その際、筋肉の収縮を利用し、筋肉中の内力を変化させることにより、関節の剛性を変化させることが可能である。例えば、人間が子供や動物に触るとき、腕の力を抜き、関節剛性を低くする。また、人間が危険を感じたとき、腕の関節剛性を高くし、頭部を守ることがある。このように、我々は無意識に場面に合わせて関節剛性を変化させる。

この脊椎動物の筋構造を模倣したのが腱駆動ロボットである。腱駆動ロボットは、筋構造の腱にあたる部位にワイヤなどを使用しており、筋肉の代わりにアクチュエータを用いて巻き取ることにより、関節を駆動させる(例えば⁽¹⁾など)。一般に、ワイヤなどは張力しか発生できないため冗長駆動系となり、システムに内力が生じる。この機構は一般的な関節部にアクチュエータを有するロボットと異なり、アクチュエータをベース部に設置することが可能なため、アームや脚な

どの軽量化を行うことができる。従って、安全性が高く、高速動作が可能である。また、冗長駆動の特性として、関節剛性可変機構を設置しワイヤ内力を調整することにより、関節剛性を変化させることができる。

以前より、研究・開発の報告がなされている関節剛性可変機構の例として、兵頭らはバネとガイドプーリを組み合わせた非線形弾性要素を持つNST⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を提案しており、小金澤らは、非線形バネとボールネジの構造で関節剛性の調整を行うAMA⁽⁵⁾や、ねじりバネを利用した非線形弾性の機構とアクチュエータを一体型にしたANLES⁽⁶⁾を提案している。

しかし、NSTは多数のバネ・ガイドプーリを使用しており、構造的に関節剛性を高める場合、内力が増加する。この内力の増加はガイドプーリなどで発生する摩擦を増加させるため、制御性の劣化を招く。AMAやANLESなども、機械部品を多く使用しているため、重量増加による危険性の増加やコストの増加、整備点検が難しいなどの問題点が挙げられる。

そこで、我々は新しい機構の関節剛性可変機構として、ベルト状プーリに注目した⁽⁷⁾。図1に示すように、

* 原稿受付 2007年12月14日。

*¹ 正員, 福岡工業大学大学院(☎ 811-0295 福岡市東区和白東3-30-1)。

*² 福岡工業大学大学院。

*³ 正員, 福岡工業大学。

E-mail: ad06003@bene.fit.ac.jp

Fig. 1 Belt-formed pulley

Fig. 2 Photograph of a belt-formed pulley

ベルト状プーリは軽量で柔軟な板バネをループ状にした構造、または、最初からループ形状を有する円筒状弾性体である。ベルト状プーリの写真を図 2 に示す。ベルト状プーリを腿駆動ロボットの関節剛性可変機構に用いる場合は、図 3 に示すように、ワイヤ経路上にベルト状プーリを挿入する。ベルト状プーリはベース部と点接続し、その反対の外側にワイヤを導いて使用する。その際、ベルト状プーリとワイヤも点接続させるため、滑りは発生しない。このベルト状プーリはワイヤの剛性とは比べ、低剛性（柔軟）であるため、ワイヤ内力によって楕円形に形状変形を起こす（図 4）。この形状変形に伴い、ワイヤ引張方向が変化するため、腿駆動ロボットの関節剛性を変化することができる。従って、ワイヤ内力を制御することにより、関節剛性を変化させることができる。ベルト状プーリを用いた関節剛性可変機構は、他の機構に比べ、軽量、低コスト、低摩擦⁽⁸⁾などの利点が挙げられる。

しかしながら、ベルト状プーリが円筒状柔軟物体であるためにワイヤ内力に対するベルト状プーリの形状を求めることは難しい。従って、ベルト状プーリを使用した剛性調整機構は、ワイヤ長さ・内力に対する関節角度・剛性の関係が明らかにされていなかった。そのため腿駆動系における、ワイヤ長さから関節角度の算出する順運動学、任意の関節角度からワイヤ長さの算出する逆運動学の計算は困難であった。そこで、その問題を解決する目的で、本報告ではベルト状プーリの近似モデルを用い、順運動学の導出について考える。

本報告では、ベルト状プーリの近似モデルを 3 種類提案する。しかし、提案するモデルのモデル精度や数値解析を行う際の演算時間などは異なるため、3 種類の中から有用性が高いモデルの選定を行う。さらに、有用性が高いと思われるモデルを用いて、1 リンクマニピュレータの順運動学について述べる。本論文では、まず初めに、ベルト状プーリの概要について述べる。

Fig. 3 One-link robot with two belt-formed pulleys

Fig. 4 Shape deformation of belt-formed pulleys depending on wire tension

次に、3 種類のモデルの有用性について説明をする。最後に、有用性の高いモデルを用いた順運動学及び、実験による検証について報告する。

2 ベルト状プーリの概要

ベルト状プーリは図 1 に示す構造をしており、剛性はワイヤより十分に小さく、非常に柔軟で軽量のプーリである。図 2 に実際の写真を示す。さらに、図 4 に示すようにベルト状プーリの下端はベース部と点接続されており、上端はワイヤと点接続している。従って、ベルト状プーリとベース・ワイヤ間では滑りは生じない。このとき、ワイヤに張力を与えることによって、ベルト状プーリは楕円状に変形し、その張力の大きさによってベルト状プーリの変形量も変化する。この弾性変形を利用してワイヤ張力方向を変化させることにより、腿駆動ロボットの関節剛性変化を可能にする。

一般に NST⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾などの剛性調整システムでは、機構的にプーリの数が多数必要である。このような構造では、ワイヤ内力の増加に伴い、動・静止摩擦の増加を招き、制御性能を著しく劣化させる。一方、ベル

Fig. 5 Simple model

Fig. 6 T-type model

Fig. 7 12-link model

ト状プーリを用いた剛性調節機構では、パーツ点数が少数であり、更に内力増加に伴う摩擦増加が極めて少ないという利点を持つ。筆者らの過去の研究では、アイドルプーリとベルト状プーリの内力増加に対する静止摩擦を測定・比較している。その結果、ガイドプーリとして一般的に用いられるアイドルプーリに比べ、ベルト状プーリは摩擦増加が1/4程度であることを確認している⁽⁸⁾。

ベルト状プーリを用いた関節剛性可変機構のシステムを説明するために、本機構を1リンク2本ワイヤの腕駆動システムに使用した場合を図3に示す。ワイヤ内力が小さい場合(図3(a))では、アームに外力が加わった時、外力がワイヤを介しベルト状プーリが変形するように作用するため、関節剛性はベルト状プーリの剛性に依存し、関節剛性は低い。次に、ワイヤ内力が大きい場合(図3(b))は、ベルト状プーリは大きく変形し、ワイヤはほぼ直線状になる。従って、ベルト状プーリの影響が少なくなり、関節剛性はワイヤ自身の剛性変化に依存し、関節剛性は高くなる。つまり、ワイヤ内力を制御することにより、関節剛性を変化させることが可能である。

しかし、ワイヤ内力によるベルト状プーリの形状を求めるのは難しいため、ワイヤ内力・ワイヤ長さに対する関節剛性・関節角度の関係は明らかになっていなかった。そこで次の章で、それらの問題を解決するために、近似モデルを提案し、解析を行う。

Fig. 8 Experimental setup for parameter identification

3 モデル化及び有用性検討

3.1 ベルト状プーリのモデル化 柔軟・弾性物体のモデル化に関しては、例えば、平井らの円筒弾性物体の変形形状の研究⁽⁹⁾や鈴木らのひも状マニピュレーションの離散モデル⁽¹⁰⁾、市川らの紐のリンクモデル⁽¹¹⁾などがある。これらの柔軟物体のモデル化は一般に、解析モデルと多リンクモデル(離散モデル)の2つに分けることが出来る。我々はシミュレーション精度及び演算時間を考慮した実用的なモデルの構築を目的としている。そこで、ベルト状プーリを後述する3種類の多リンクモデルにモデル化を行い、解析する。そして、それらのシミュレーション精度及び、演算時間を比較し有用性を検討する。

提案する3種類の近似モデルをそれぞれ図5、図6、図7に示す。図5はシンプルモデルと呼び、2つの関節を有している。モデル誤差は大きいが発算時間が短いと期待が持てる。図6はT字モデルと呼び、3つの関節を有している。シンプルモデルよりモデルの精度が良いと考えている。図7は12リンクモデルと呼び、最も現実に近いモデルであるが、演算時間が長いと思われる。

ただし、T字モデルの剛体リンクの長さを17mmと設定した。この剛体リンクの長さは、ベルト状プーリと2本のワイヤが接する点の間の距離を表している。後に説明するベルト状プーリを使用したシステムでは、ベルト状プーリが変形をせずワイヤも弛まない状態のとき、この接点間の距離はCCDカメラの測定より約17mmであるため、剛体リンクの長さを17mmとした。

3.2 パラメータ同定 それぞれのモデルのパラメータ同定では図8に示すシステムを用いて実験を行った。図8に示すシステムにワイヤ内力を与えた際、ベルト状プーリは変形を起すため、その形状をCCDカメラを用いて測定した。測定したベルト状プーリの形状とワイヤ内力より、各モデルのパラメータを求め

Table 1 Specification of three models

Simple model	
Translational Spring Constant	0.125[N/mm]
Rotational Spring Constant	2.62[N · mm/deg]
T-Type model	
Translational Spring Constant	0.141[N/mm]
Rotational Spring Constant $K_{\psi 1}$ (base side)	2.62[N · mm/deg]
Rotational Spring Constant $K_{\psi 2}$ (outside)	0.189[N · mm/deg]
12-link model	
Rotational Spring Constant	0.94[N · mm/deg]

Fig. 9 One-link manipulator using each model for simulation

Fig. 10 Experimental setup to measure joint stiffness of a one-link manipulator

た. 3つのモデルのパラメータを表1に示す. ただし, パラメータ同定に使用したベルト状プーリは, 直径65[mm], 幅30[mm], 重量3[g], 材質ポリエチレンテレフタレートである(図2).

3.3 モデルの有用性検証 この節では, 本論で提案する3つのモデルの有用性について調べる. モデルの有用性はシミュレーション精度及び, 演算時間を考慮し検討する. 提案する3つのモデルを用いた1リンクマニピュレータについて, 内力に対する関節剛性の変化をシミュレーションし, 実験値と比較を行った. シミュレーションには動力学シミュレータ(NASTRAN4D)を使用しており, 図9に示す装置を仮想的に製作し, シミュレーションを行った. ただし, シミュレーションではワイヤの変位は微小とし, それぞれの関節プーリとワイヤは図9の点Aで点接続していると仮定している. また, シミュレーションでの関節角度を収束させる目的で, 各モデルのそれぞれの関節に粘性を与えた. その粘性係数はシンプルモデル

Fig. 11 Comparison of joint stiffness between experiment and simulation result

Fig. 12 Calculation time of each approximate model (per 1[s] in simulation)

及びT字モデルの直動関節に 1×10^{-4} N·s/mm, 回転関節に 1×10^{-4} N·mm s/deg, 12リンクモデルの回転関節に 4.402×10^{-4} N·mm s/degであり, 経験的に妥当と思われる値である. しかし, シミュレーションでは準静的に行うため, この粘性係数は関節剛性の結果に直接影響を与えない.

実際の関節剛性実験は図10に示す装置を用いて測定を行う. 測定方法は, システムにワイヤ内力を与え, 関節プーリに外力 F を与える. そして, そのときの関節角度 θ を測定する. その際, 図10に示すようなシステムの一般的な関節剛性 K は以下のように表せられる.

$$K = \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \quad (1)$$

測定結果及び, 式(1)を用いて関節剛性 K を求めた. ただし, 使用したベルト状プーリは, パラメータ同定で使用したものと同一のものである.

関節角度 $\theta = 0$ の時の関節剛性のシミュレーション結果と実験結果を図11に示す. 図11より実験値に最も近いのは12リンクモデルであるが, 比較的T字モデルも近い. しかし, シンプルモデルはモデル誤差が大きい. 次に, シミュレーション内で1秒間のベルト状プーリの形状変形を計算するのに要した時間を図12に示す. シンプル・T字モデルは演算時間は短く, 12リンクモデルは他と比べて, 約1500倍も長い. 12リンクモデルの演算時間は実用的とは言い難い. 従って, これらの結果及び演算時間より, T字モデルが有用的と考えられる. 次の章では, T字モデルを用いた順運動学について述べる.

Fig. 13 Coordinates of one-link manipulator using T-type modeled belt-formed pulleys

Fig. 14 Involute curves of end point of wires

4 T字モデルを用いた順運動学 (1リンクシステム)

4.1 問題設定 ベルト状プーリを使用したシステムの順運動学を導くにあたり、前章で有用性の高いと考えられるT字モデルを用いる。その際、図13に示す2本ワイヤからなる1リンク駆動マニピュレータを想定し順運動学を求める。ただし、ここで述べる順運動学はアクチュエータプーリの回転角度（ワイヤ巻取り角） $\Delta q_1, \Delta q_2$ から、関節角度 θ を導出することを意味する。図13において、各ワイヤは関節及びアクチュエータのプーリに接続され、プーリに巻かれているため、ワイヤとプーリの間には滑りは生じない。従って、点 P_{J1} から関節のプーリを介して点 P_{J2} までのワイヤ長さは変化しない。図13のシステムでは、T字モデルの直動パネの変位を α_1, α_2 、回転パネの変位を $\psi_{O1}, \psi_{B1}, \psi_{O2}, \psi_{B2}$ とする。また、パネの自然長 ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0, \psi_{O1} = \psi_{B1} = \psi_{O2} = \psi_{B2} = \pi/2$) の時に初期状態 ($\theta = 0, \Delta q_1 = \Delta q_2 = 0$) とする。ただし、初期状態では、ワイヤは弛みがないとし、これらの初期状態がT字モデルの形状を求める際の境界条件となる。

このシステムでは、アクチュエータプーリの回転角度 $\Delta q_1, \Delta q_2$ が入力された際、ベルト状プーリ (T字モデル) は変形し、関節角度 θ が一意に決定する。このとき、ベルト状プーリはワイヤの拘束を受けながら、最小作用の原理より内部ポテンシャルエネルギーが最小になる形状になる。そこで、ベルト状プーリのポテンシャルエネルギー及び、ワイヤによるT字モデル

Table 2 Parameters

Symbol	Description
α, α_2	Displacement of translational spring
$\psi_{O1}, \psi_{B1}, \psi_{O2}, \psi_{B2}$	Displacement of rotational spring
K_α	Translational spring coefficient
$K_{\psi1}, K_{\psi2}$	Rotational spring coefficient
L	Rigid body length of T-Type model
r_p, r_a	Pulley radius of joint and actuator
η_θ, ξ	Wire reel out angle
η_{in}, ξ_{in}	Starting angle of involute curve

の幾何学的拘束を用いて、順運動学の導出を行う。システム全体の内部ポテンシャルエネルギー U を以下に示す。

$$U = U_1 + U_2 \quad (2)$$

$$U_1 = \frac{1}{2} \{ K_\alpha \alpha_1^2 + K_{\psi1} \psi_{O1}^2 + K_{\psi2} \psi_{B1}^2 \} \quad (3)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \{ K_\alpha \alpha_2^2 + K_{\psi1} \psi_{O2}^2 + K_{\psi2} \psi_{B2}^2 \} \quad (4)$$

ここで、 U_1, U_2 はそれぞれ図13に示す2つのベルト状プーリ (T字モデル) の内部エネルギーを表している。また、本章において、使用している変数の概要を表2に示す。ベルト状プーリ (T字モデル) の拘束条件については4.2節で説明し、具体的にポテンシャルエネルギーを用いて関節角度 θ を求める方法については4.3節で述べる。

4.2 T字モデルによる拘束条件 T字モデルの変形時における幾何学的な拘束条件について考える。図13に示すように、T字モデルにおける外側リンクの両端 ($P_{J1}, P_{A1}, P_{J2}, P_{A2}$) はワイヤに接続されており、リンク部はワイヤ端の軌跡に拘束される。

まず図13における上部のT字モデルに注目する。さらに、拘束の状態を説明するために、そのT字モデルの剛体リンクとワイヤによる拘束の様子を図14に示す。図14に示すように、初期状態からアクチュエータ回転角度を $\Delta q_1, \Delta q_2$ を与えとき、関節プーリの角度が θ となった場合を考える。この際、 P_{J1} に接続されているワイヤは関節プーリに、 P_{A1} に接続しているワイヤはアクチュエータプーリに巻き付けられており、滑りは発生しない。従って、プーリに巻きついているワイヤの端はインボリュート曲線を描くため、T字モデルとの接続点 P_{J1}, P_{A1} は、インボリュート曲線上に拘束される。

例えばワイヤ端 P_{J1} について考えると、インボリュート曲線は図15に示すように、ワイヤが弛まなく滑らない状態で、ワイヤをプーリに巻き付ける際のワイヤ端の軌道である。図15(I)~(IV) は点Aでワイヤをプー

Fig. 15 Involute curves of end point of wire on joint pulley

リに接続しプーリを固定した状態で、ワイヤを巻き付ける様子を表している。ワイヤをプーリに巻き付けていくと、ワイヤ端 P_{J1} はいずれプーリと接触する (図 15(IV))。この接触する点を点 C とする。図 15(II), (III) に示すように、ワイヤとプーリの接点を点 D すると、インボリュート曲線上のワイヤ端 P_{J1} の位置は角度 $\angle COD$ に依存し、これを η_{inv} と記する。また図 14 に示すように、OD と x 軸のなす角を η_θ 、 $\angle BOC = \eta_{in}$ と定義する。インボリュート曲線に拘束されるリンク端 P_{J1} (x_p, y_p) は以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_{in} + \theta) & -\sin(\eta_{in} + \theta) \\ \sin(\eta_{in} + \theta) & \cos(\eta_{in} + \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_p \\ \hat{y}_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_p &= r_p(\cos \eta_{inv} + \eta_{inv} \sin \eta_{inv}) \\ \hat{y}_p &= r_p(\sin \eta_{inv} - \eta_{inv} \cos \eta_{inv}) \\ \eta_{inv} &= -(\eta_{in} + \theta + \eta_\theta) \end{aligned}$$

ここで、 $\eta_{inv} = -(\eta_{in} + \theta + \eta_\theta)$ であることに注目されたい。ただし、 η_{in} は定数であり、初期条件から求められる。

同様に、アクチュエータ側のリンク端 P_{A1} も $\xi, \xi_{in}, \Delta q_1$ (図 14 参照) より求めることができる。その際、T 字モデルの形状 ($\alpha_1, \alpha_2, \psi_{O1}, \psi_{B1}, \psi_{O2}, \psi_{B2}$) は幾何学的には無限に解の候補を持つ。しかしながら、先述したように内部エネルギーが最小となる形状がその解となる。次に、解算出のアルゴリズムを説明する。

4.3 運動学の算出手順 上述した条件より、アクチュエータ回転角度 $\Delta q_1, \Delta q_2$ を与えた時のリンク角度 θ を算出する。その際、T 字モデル (ベルト状プーリ) の形状を求めるために内部エネルギー U の最小値 (U_{min}) を数値的に求める。内部エネルギーの最小値 U_{min} を求める手法はいくつか存在するが、本論文

Fig. 16 Flowchart of forward kinematics

では、非線形計画法を用いた。

算出アルゴリズムの概略を図 16 に示す。本計算は主に 2 つの非線形計画法から成り立つ。1 つ目はアクチュエータ回転角度 $\Delta q_1, \Delta q_2$ とリンク関節角 θ を与えた際に、4.2 節で説明した拘束条件下でそれぞれの T 字モデルの内部エネルギー U_1, U_2 を最小にすることで、T 字モデルの形状 ($\alpha_1, \alpha_2, \psi_{O1}, \psi_{B1}, \psi_{O2}, \psi_{B2}$) を決定するサブルーチンである。2 つ目はサブルーチンで使用する θ を変数としたメインルーチンである。この手順を経て、アクチュエータ回転角度 (ワイヤの巻き取り角) $\Delta q_1, \Delta q_2$ から関節角 θ を求めることが出来る。

4.4 順運動学比較実験 前述した T 字モデルを用いた順運動学と実験値との比較を行った。実験方法は 3.3 節で使用した実験装置 (図 10) を用いて、アクチュエータの回転角度 $\Delta q_1, \Delta q_2$ を入力として与え、関節角度 θ を測定した。その際、使用したベルト状プーリは、3.2 節のパラメータ同定に用いたベルト状プーリと同一のものを使用した。順運動学でも、3.2 節で求めたパラメータを使用した。

提案する T 字モデルから導出された順運動学の結果を図 17、実験の結果を図 18 に示す。図 18 のプロット点は測定点を表している。一見すると、双方の結果は平面 (線形) に見えるが、完全な平面ではない。さらに、順運動学と実験の誤差を図 19 に示す。ただし、横軸が関節角度 θ 、縦軸が誤差ノルム ($\sqrt{e_\theta^2}$, e_θ : 関節角度の誤差) である。図 19 より、関節角度が $\pm 30[\text{deg}]$ 以内であれば、誤差は概ね $1[\text{deg}]$ 未満である。また、関節角度 θ の増加に伴い、誤差も増加しているように見られる。

5 おわりに

本報告では、ベルト状プーリを用いたシステムのワイヤ長さ・内力による、関節角度・関節剛性の関係性を明らかにするために、近似モデルの提案を行った。提

Fig. 17 Result of forward kinematics using T-type model

Fig. 18 Experimental result of forward kinematics

Fig. 19 Error norm of joint angle

案した近似モデルを用いて、実験値と比較を行い、シミュレーション精度及び演算時間から、有用性が高いモデルを選出した。次に、有用性の高い近似モデルを用いて順運動学の手法を紹介した。この順運動学は、1リンクマニピュレータを想定しており、アクチュエータの回転角度を入力とした場合、幾何学的拘束条件を用いて、ベルト状プーリのモデルのポテンシャルエネルギーが最小となる形状より、関節角度を求める手法である。さらに、この順運動学及び、実験装置を用いた測定と比較の結果、関節角度が ± 30 [deg]以内であれば、誤差は概ね1[deg]未満であった。今後はこの順運動学を拡張し、アクチュエータ角度 $\Delta q_1, \Delta q_2$ から、関節剛性を求める方法の確立や、逆運動学の導出が課題である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、日本フレックス工業株式会社にはワイヤケーブル等の実験器具を提供をいただき感謝いたします。また、同社の福士年則氏からワイヤケーブルに関する多数の助言をいただき、心から感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Hirose and S. Ma, Redundancy Decomposition Control for Multi-Joint Manipulator, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*(1989), pp.119-124.
- [2] Hyodo, K., Kobayashi, H., A Study on Tendon Controlled Wrist Mechanism with Nonlinear Spring Tensioner., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.8(1993), pp.1244-1251.
- [3] Ogane, D., Hyodo, K., Kobayashi, H., Mechanism and Control of a 7 D.O.F. Tendon-Driven Robot Arm with NST, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.8(1996), pp.1152-1159.
- [4] Kobayashi, H., Ozawa, R., Adaptive Neural Network Control of Tendon-Driven Mechanisms with Elastic Tendons., *Automatica*, Vol.39(2003), pp.1509-1519.
- [5] Koganezawa, K., Watanabe, Y., Shimizu, N., Antagonistic Muscle-like Actuator and application to Multi-D.O.F. Forearm Prosthesis, *Advanced Robotics*, Vol.12, No.7,8(1999), pp.771-789.
- [6] Koganezawa, K., Shimizu, Y. Mechanical Stiffness Control of Tendon Driven Multi-DOF joint by the Actuator With Non Linear Elastic System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.22, No.8(2004), pp.1043-1049.
- [7] Kino, H., Okamura, N., Yabe, S., Basic Characteristics of Tendon-Driven Manipulator Using Belt Pulleys, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(2004), TP2-H5.
- [8] Kino, H., Nakiri, D., Nakamura, T.: "Proposal of Static Friction Measuring Method and Experimental Investigation of Static Friction Characteristic of Belt-Formed Pulley for Variable Joint Stiffness on Tendon-Driven Robot", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.073, No.732(2007), pp.138-145.
- [9] Hirai, S., Matsuyama, Y.: "Experimental Analysis of Jumping by Body Deformation of Circular Robot", *JSME Conference on Robotics and Mechatronics*(2006-5), 1P1-B29.
- [10] Suzuki, T., Ebihara, Y.: "Dynamic Control of Hyper-Flexible Manipulator -Sensing and Control System on Casting and Winding-", *Robotics Symposia*(2006-3), 1B4.
- [11] Ichikawa T., Hashimoto M.: "Dynamic manipulation of string by a robot manipulator", *Robotics Symposia*, Vol.7th(2003-3), pp.371-376.