

綱渡りロボットのモデル化と安定化制御

Modeling and stabilization of rope walking robot

児玉 迪弘(高知工科大) 島田 真志(高知工科大)

向田 洋平(高知工科大) 岡 宏一(高知工科大)

Michihiro KODAMA, Kochi University of Technology, Tosayamadacho Miyanoguti185, Kami, Kochi

Masashi SIMADA, Kochi University of Technology

Yohei MUKAIDA, Kochi University of Technology

Koichi OKA, Kochi University of Technology

This paper describes modeling and simulation results about a robot moving on the rope. The robot has same moving mechanism as a bicycle, and is added a balancing arm. The arm is controlled by a linear actuator, and make the bicycle to hold upright position. First, the structure of the robot is introduced. Model of the robot is made and the controllability of the robot is examined by some states of structure. Simulation results are shown and the feasibility of the proposed robot is verified.

Key Words: Robot, Modeling, Stabilization, Simulation

1. 緒言

近年人間と同様の動きを行うことによって見て楽しめるロボットが見受けられる⁽¹⁾.本研究でも同様なロボットとして綱渡りロボットについて考察する.このロボットは自転車のように2つの車輪を持ち,本体に取り付けられたアームでバランスをとりながらロープの上を自律して進むロボットである.今回は綱渡りロボットのモデル化とシミュレーションを行ったので,その結果について報告する.

2. 綱渡りロボットの概要

このロボットは, Fig.1のように前後に車輪を持ち,ロープの上を本体に取り付けられた左右にスライドする制御棒でバランスを取りながら進んでいく機構を持ったものである.左右にスライドする制御棒を Fig.2のように機体が傾いた方向に腕をスライドさせることによって生じた反力を起き上げる力として利用し,姿勢を制御するものとする.

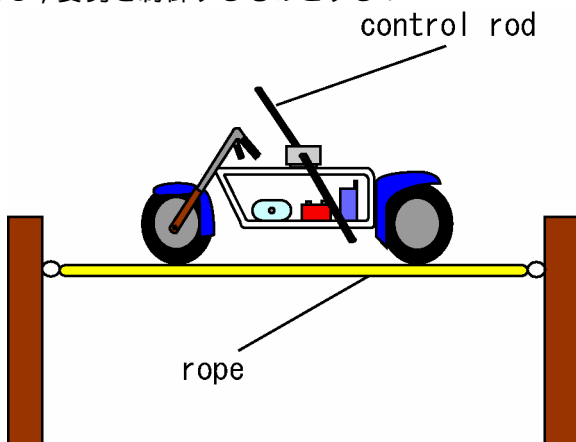


Fig.1 Model of robot

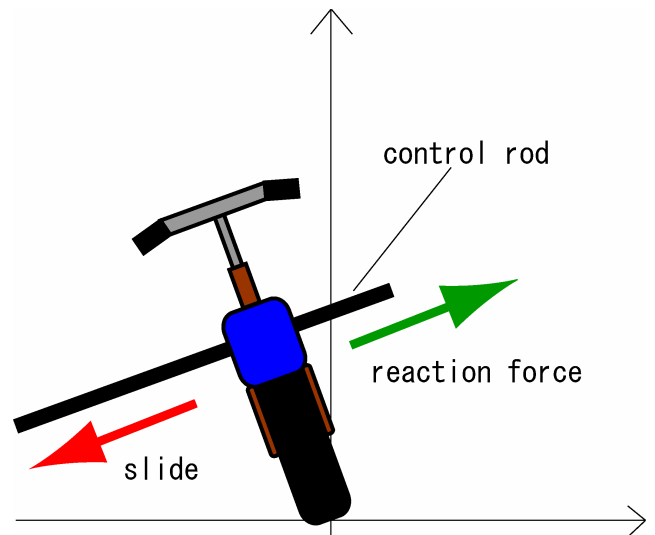


Fig.2 Image of reaction force

3. モデル化

このロボットは,左右のバランスさえ取ることができれば,車輪によって前に進むことは容易に実現できると考え,左右のバランスを取ることに主眼を置いてモデル化を行う.モデルは平地のように固い地面にあると考えて行ったものと,ロープの上を走行することを考えてロープの動きもモデル化に含めたものの2つを考えた.

3-1. 平地でのモデル化 ロープには乗せずに平地での姿勢制御についてモデル化を行う.モデル化のために,機体を正面から見た略図を Fig.3に示す.左右にスライドしてバランスを取る部分をアームとし,そ

れ以外の部分をボディとする。モデル化において利用する記号を以下に示す。各記号の値は試作機の値である。

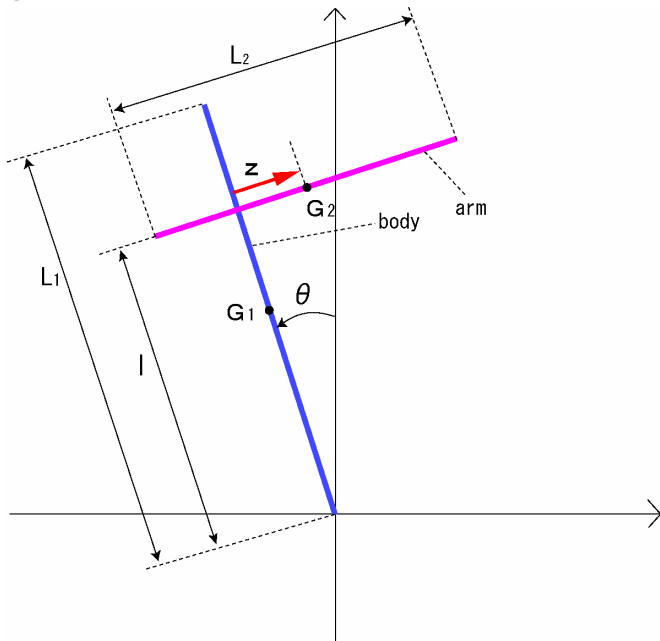


Fig.3 Model in plain

$M_1(=22.4[kg])$, $M_2(=2[kg])$:ボディ, アームの質量
 $L_1(=0.486[m])$, $L_2(=0.555[m])$:ボディ, アームの長さ
 G_1, G_2 :ボディ, アームの重心
 q :ボディの傾き
 z :アームの変位
 $J_1(=0.4409[kg \cdot m^2])$, $J_2(=0.0513[kg \cdot m^2])$: G_1, G_2 での慣性モーメント
 $L_{1G} = 0.243$:ロープとボディの接点から G_1 までの長さ
 l :ロープとボディの接点からアーム固定部分までの長さ

以上のように設定し, ラグランジュの方法⁽²⁾を使って運動方程式を求めると,

$$\begin{cases} \left(M_1 L_{1G}^2 + \frac{1}{12} M_1 L_1^2 + M_2 z^2 + M_2 n^2 + \frac{1}{12} M_2 L_2^2 \right) \ddot{q} \\ - M_2 l \ddot{z} - (M_1 L_{1G} + M_2 n) g \sin q + M_2 g z \cos q = 0 \\ M_2 \ddot{z} - M_2 l \ddot{q} + M_2 g \sin q = f \end{cases}$$

となる。これを $q=0$ 付近で線形化を行い, 状態方程式に直すと,

$$\dot{x} = Ax + bu$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M_1 g L_{1G}}{M_1 L_{1G}^2 + M_2 l^2 + J_1 + J_2} & 0 & -\frac{M_2 g}{M_1 L_{1G} + M_2 l^2 + J_1 + J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_1 l g L_{1G} - (M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2) g}{M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2} & 0 & -\frac{M_2 l g}{M_1 L_{1G} + J_1 + J_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l}{M_1 L_{1G}^2 + M_2 l^2 + J_1 + J_2} \\ 0 \\ \frac{M_1 L_{1G}^2 + J_1 + M_2 n^2 + J_2}{M_2 (M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2)} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad u = f$$

となる。ここでの f はアームを左右に駆動させるモ

ータの駆動力とする。

試作ロボットの値を用いて可制御性行列を導きそのランクを調べるとランクは 4 であり, このシステムは可制御であることが分かった。

ただし状態方程式の A 行列の 4 行 1 列目の値が 0 となる $l = \frac{M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2}{M_1 L_{1G}}$ の値を用いて可制御性を調

べるとランクは 2 となり, 可制御ではないことが分かり, この位置にアクチュエータを取り付けると制御は出来ないことが分かった。

3-2. ロープ上でのモデル化

次にロボットがロープの上を走行するためのモデルについて考察した。モデル化のために, 機体を正面から見た略図を Fig.4 に示す。機体に乗る前のロープの通過位置を原点として, 機体に乗っているときのロープのたわみは常に原点から一定であると仮定する。つまりロボットの最下点はある点 O を中心に円弧上を動くとした。モデル化のために用いる記号を以下に示す。

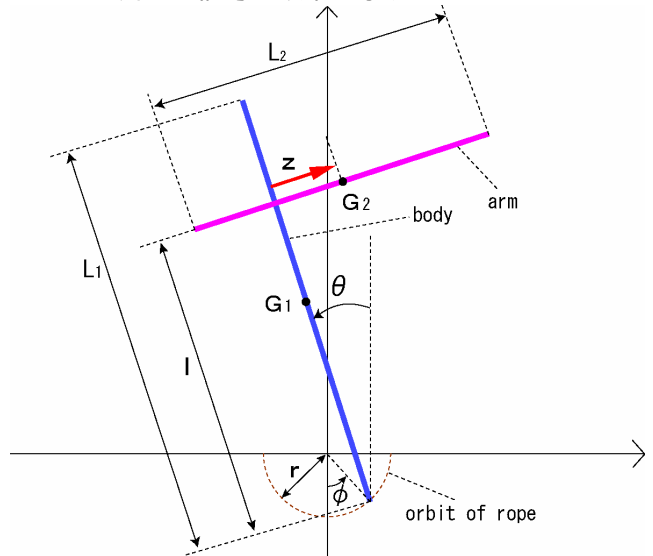


Fig.4 Model on rope

$M_1(=22.4[kg])$, $M_2(=2[kg])$:ボディ, アームの質量
 $L_1(=0.486[m])$, $L_2(=0.555[m])$:ボディ, アームの長さ
 G_1, G_2 :ボディ, アームの重心
 q :ボディの傾き
 r :ロープのたわみ
 f :ロープのゆれの角度
 z :アームの変位
 $J_1(=0.4409[kg \cdot m^2])$, $J_2(=0.0513[kg \cdot m^2])$: G_1, G_2 での慣性モーメント
 $L_{1G} = 0.243$:ロープとボディの接点から G_1 までの長さ
 l :ロープとボディの接点からアーム固定部分までの長さ

ラグランジュの方法を使って運動方程式を求めると,

4. シミュレーション

4-1. 平地でのシミュレーション フィードバックゲインを、最適レギュレータを用いて求め、シミュレーションを行った。その結果を Fig.5, Fig.6 に示す。シミュレーションは、ボディの傾きの初期状態を $q = 0.00$ [rad] として行った。

Fig.5 は $l = 0.4$ の時、Fig.6 は $l = 0.2$ の時である。

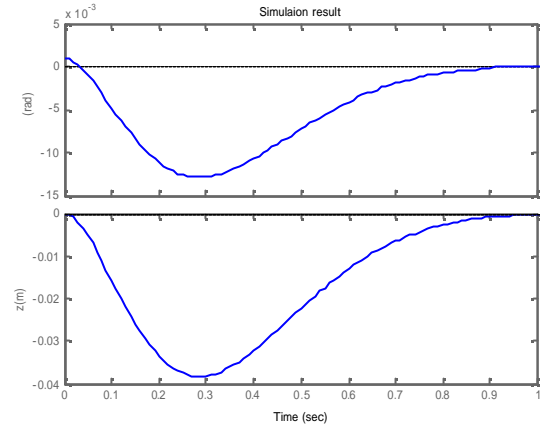


Fig.5 Simulation result of $l=0.4$

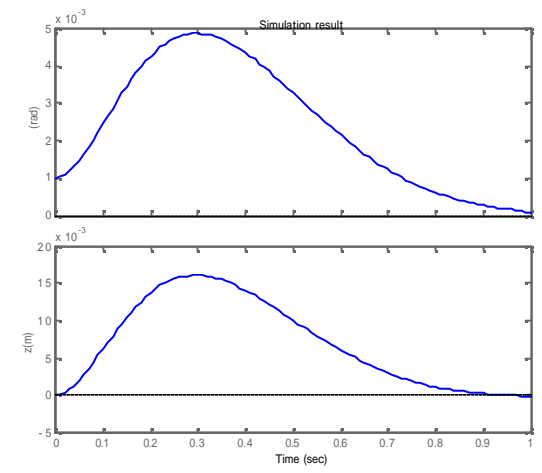


Fig.6 Simulation result of $l=0.2$

Fig.5 では最初に z がマイナス方向に動いてバランスをとっていることが分かる。これより、想定したとおりの方で、ボディが傾いた方向にアームがスライドしてバランスをとっていることが分かる。

しかし、Fig.6 では z がプラス方向に動いてバランスをとっている。これは、想定した動作とは逆の方法で、ボディが傾いた方向と逆方向にアームをスライドさせてバランスをとっていることがわかる。このように $l = \frac{M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2}{M_1 L_{1G}}$ を境としてアクチュエータが比

較的高い場所に取り付けていない場合には傾いた方向にアームを駆動することにより傾きを復元できるが、 l が小さい時、つまりアクチュエータの位置が低いところに取り付けた場合には、傾いた方向とは逆方向にアームを駆動することにより復元を行うことが分かった。

4-2. ロープ上でのシミュレーション フィードバ

$$\begin{cases} (M_1 L_{1G}^2 + M_2 z^2 + M_2 n^2 + J_1 + J_2) \ddot{q} - M_1 g (L_{1G} - r) \sin q - M_2 n \ddot{z} \\ - \{M_1 L_{1G} r \cos(q-f) + M_2 n r \cos(q-f) + M_2 r z \sin(q-f)\} \ddot{f} \\ - \{M_1 L_{1G} r \sin(q-f) + M_2 n r \sin(q-f) - M_2 r z \cos(q-f)\} \dot{f}^2 \\ + 2M_2 z \dot{z} \dot{q} + M_2 g (z \cos q - n \sin q) = 0 \\ (M_1 r^2 + M_2 r^2) \ddot{f} - \{M_1 L_{1G} r \cos(q-f) + M_2 n r \cos(q-f) + M_2 r z \sin(q-f)\} \ddot{q} \\ + \{M_1 L_{1G} r \sin(q-f) + M_2 n r \sin(q-f) - M_2 r z \sin(q-f)\} \dot{q} \\ + M_2 r \cos(q-f) \dot{z} + M_2 g r \sin f - 2M_2 r \sin(q-f) \dot{q} \dot{f} = 0 \\ M_2 \ddot{z} - M_2 n \ddot{q} + M_2 r \sin(q-f) \dot{f}^2 + M_2 r \cos(q-f) \ddot{f} + M_2 g \sin q - M_2 z \dot{q}^2 = f \end{cases}$$

となる。これを $\ddot{x} = Ax + bu$, $f=0$ 付近で線形化を行い、状態方程式に直すと、

$$\dot{x} = Ax + bu \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ 0 \\ b_{41} \\ 0 \\ b_{61} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & 0 & a_{63} & 0 & a_{65} & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ f \\ \dot{f} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad u = f$$

$$a_{21} = \frac{\{M_2 L_{1G} + M_1 (L_{1G} - r)\}g}{J_1 + J_2}$$

$$a_{23} = -\frac{M_2 L_{1G} g}{J_1 + J_2}$$

$$a_{25} = -\frac{M_2 g}{J_1 + J_2}$$

$$a_{41} = \frac{\{J_a M_2 + M_1^2 L_{1G} (L_{1G} - r)\}g}{M_1 (J_1 + J_2) r}$$

$$a_{43} = -\frac{J_a M_2 g}{M_1 (J_1 + J_2) r}$$

$$a_{45} = -\frac{L_{1G} M_2 g}{(J_1 + J_2) r}$$

$$a_{61} = \frac{\{M_1^2 L_{1G} (L_{1G} - l) - (M_1 + M_2) (J_a - M_1 L_{1G} l)\}g}{M_1 (J_1 + J_2)}$$

$$a_{63} = \frac{M_2 g (J_a - M_1 L_{1G} l)}{M_1 (J_1 + J_2)}$$

$$a_{65} = \frac{M_2 g (L_{1G} - l)}{J_1 + J_2}$$

$$b_{21} = \frac{l - L_{1G}}{J_1 + J_2}$$

$$b_{41} = -\frac{J_a - M_1 L_{1G} l}{M_1 (J_1 + J_2) r}$$

$$b_{61} = \frac{M_1 (l - L_{1G}) (M_1 L_{1G} + M_2 l) + (M_1 + M_2) (J_a - M_1 L_{1G} l)}{M_1 M_2 (J_1 + J_2)}$$

$J_a = M_1 L_{1G}^2 + J_1 + J_2$ となる。

試作ロボットの値を用いて可制御性行列を導きそのランクを調べるとランクは 6 であり、このシステムは可制御であることが分かる。

また、特異点として A または b の要素が 0 になる時を考察した。しかし今回の場合はどの場合においてもどの場合でもランクは 6 となり可制御であった。

ックゲインを，最適レギュレータを用いて求め，シミュレーションを行った。

今回も同様にボディが $0.001[\text{rad}]$ 傾いたところからシミュレーションを行った。またアクチュエータの位置 l だけでなくロープの可動半径 r を変化させてシミュレーションを行った。

Fig.7, Fig.8, Fig.9はアームの取り付け位置 l を固定してロープのたわみ r を変えたシミュレーション結果で, Fig.10, Fig.11, Fig.12はロープのたわみ r を固定してアームの取り付け位置を変えたシミュレーション結果である。

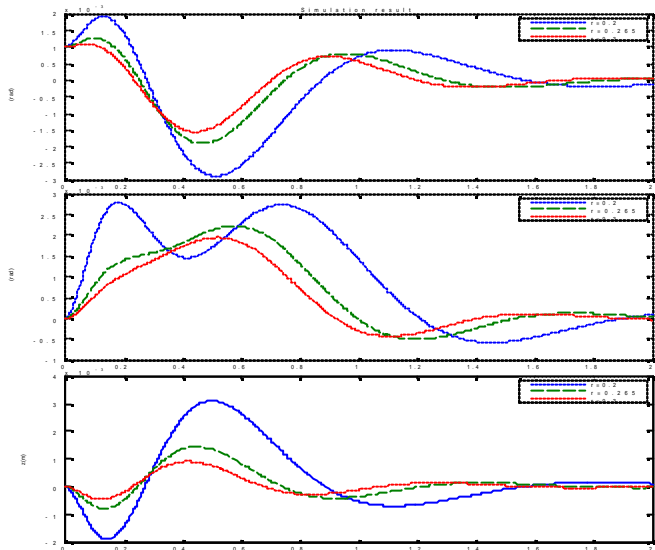


Fig.7 Simulation result of $l=0.1$

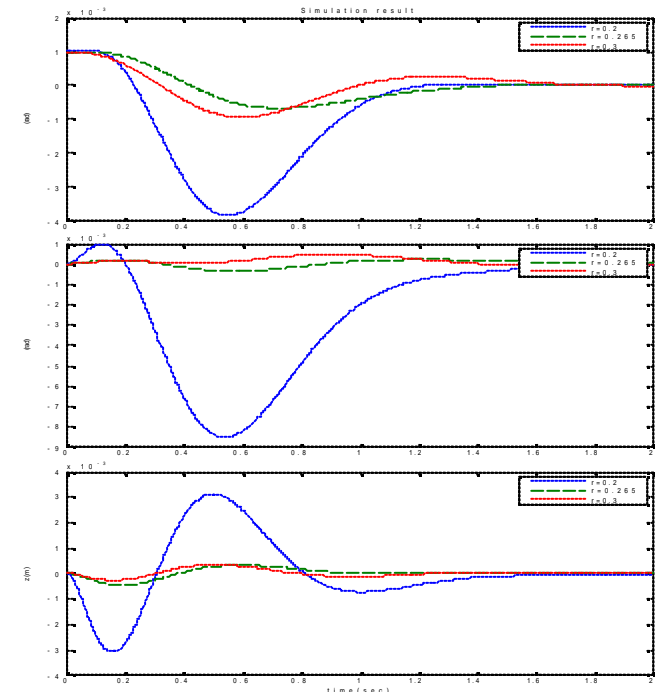


Fig.8 Simulation result of $l=0.243$

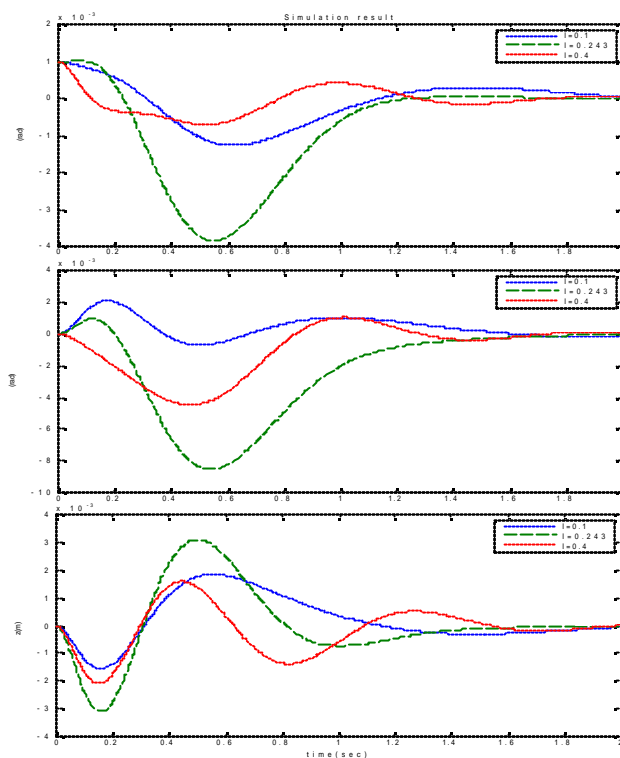


Fig.9 Simulation result of $l=0.4$

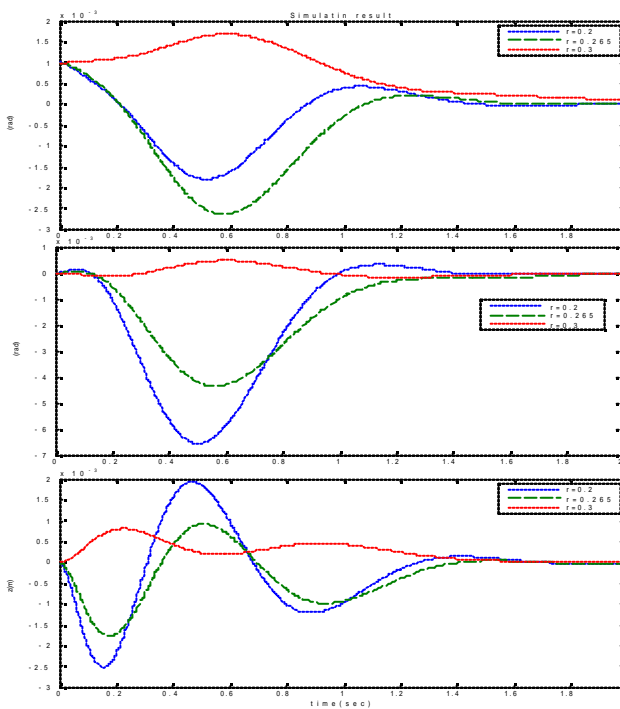


Fig.10 Simulation result of $r=0.2$

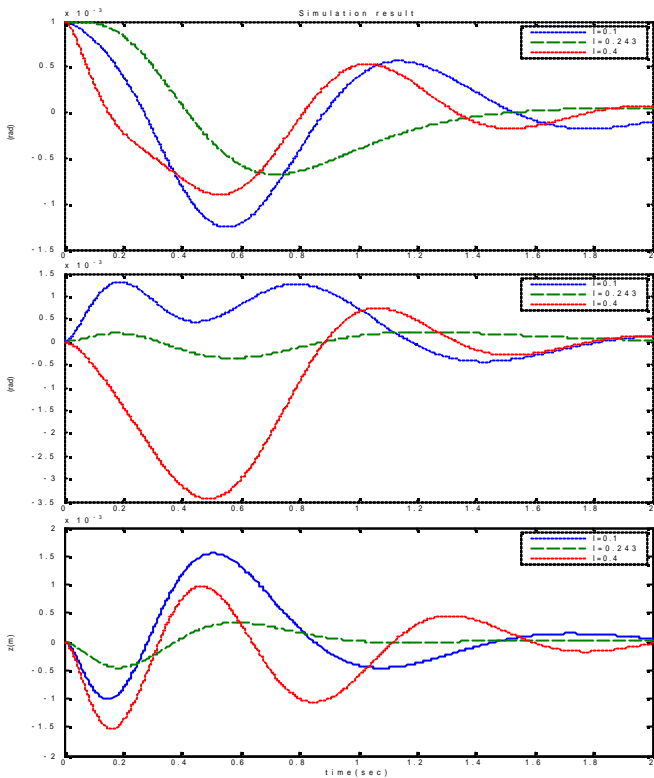


Fig.11 Simulation result of $r=0.265$

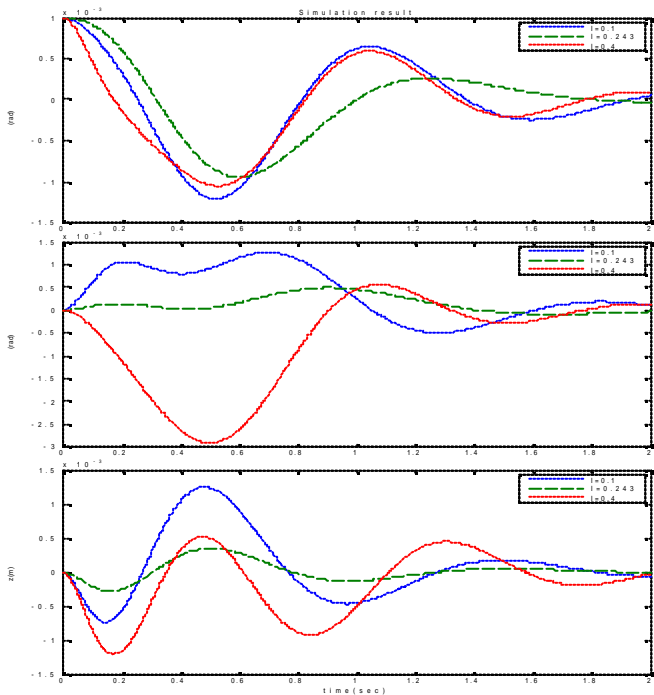


Fig.12 Simulation result of $r=0.3$

Fig.7から Fig.12より、想定のとおり、ボディが傾いた方向にアームをスライドさせてバランスをとっていることが分かる。

Fig.7から Fig.9よりロープをきつく張るほどロープの揺れが激しくなることが分かる。

Fig.10から Fig.12より重心より高いところにアームを取り付けた方が機体の安定を保っていることが分かる。しかしロープのたわみは重心に近い場所にアームを取り付けた方が安定することが分かる。また、どの結果もロープは同じ方向にたわんでいることも分か

る。

またアームの取り付け位置を固定してロープのたわみを変えて行ったシミュレーション結果である Fig.7 から Fig.9 のロープのはじめに動く方向が Fig.7 と Fig.8 は、すべてはじめにプラス方向に動いているが、Fig.9 はすべてはじめにマイナス方向に動いていることが分かる。ロープが動く方向が逆になることがどのような物理的現象であるかは検討中である。

5. 結言

試作した綱渡りロボットを対象にモデル化を行い、ロボットがロープ上にある場合をとない場合について可制御性について調べた。その結果平地上でのロボットはアームの取り付け位置によっては不可制御の場合があることが分かった。

次にボディがわずかに傾いた時のシミュレーションを行った。この結果ロープのたわみがロープの揺れに関連していることが分かった。また、アームの取り付け位置がロープの揺れや機体の安定性に関連していることが分かった。

今後はこのシミュレーション結果を基に綱渡りロボットを実際に制御していく。

文献

- [1] Honda アシモ <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
村田製作所ムラタセイサク君 <http://www.murataboy.com/>
- [2] 原文雄, 機械系基礎工学 4 機械力学