

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-12-09

マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究：コンピュータシミュレーションとロボットの設計、製作

SAITO, Masafumi / 斎藤, 欽文

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012972>

マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究 -コンピュータシミュレーションとロボットの設計、製作-

STUDY OF ACROBAT ROBOT USING MOUNTAIN BIKE
-COMPUTER SIMULATION AND, DESIGN AND CONSTRUCTION OF BIKE-TRIAL ROBOT-

齋藤 欽文
Masafumi SAITO
指導教員 高島 俊

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Recently demands for robots, that can do difficult works at various situations for human, are increasing rapidly. Such robots, in general, use wheels, crawler and legs as transportation means and deal with various terrains individually. This research aims to give robots the special moving ability, by developing the robots that can realize the high level athletic ability of human athletes. In this paper, bike-trial techniques are focused for the robot ability, and the study of simulating bike-trial performances by an athlete and a mountain bike is discussed. This paper proposes how to perform "Wheelie" and how to generate the joint trajectories for the maneuver "Daniel". Furthermore, a bike-trial robot is designed and made for the experimental use.

Key Words : Bike-trial Robot, Computer simulation, Wheelie

1. はじめに

近年、人間に代わって様々な状況で活動できるロボットへの需要が急増している。そのようなロボットは、車輪、クローラ、脚歩行などを移動手段として用いて、それぞれ個々に様々なテレインに対応している。一般に車輪型ロボットは、段差や凹凸を含む不整地を走行することは苦手であり、特に瓦礫や岩山などを車輪型ロボットによって走破した例はいまだ存在しない[1][2]。しかし、車輪型ロボットの高速移動能力に加えて、不整地を走行できるような技術が確立されれば、人間が簡単に入ることができない災害現場や山道での遭難者捜索などへの応用が十分考えられる。

本研究では、人間の高度な運動能力を実現するロボットを開発することで、人間が使う特殊な移動手段をロボットに与えることを目指している。不整地や障害を乗り越える各動作の一つ一つはバイクトライアルに用いられる技と捉えることができる。したがって、本研究の目的として、バイクトライアルに用いられる曲技が実現可能なロボットの製作を目標とする。昨年度までに曲技の解析、ロボットの設計、製作を行ってきた[3][4][5]。本論文では、解析研究として、ロボットと自転車の7リンクモデルを作成し、それに対してWheelieのシミュレーション、Danielの実現のための制御戦略の導出と重心位置を目標にした関節軌道の生成方法についての研究を示し、さらに実験用ロボットの設計、製作について述べる。

2. バイクトライアルとは

バイクトライアルとは、既定の自転車に乗り、岩場などの不整地で構成されたセクションを、曲技を用いて時間内に走破する競技である。時間制限の超過や足つきなどで減点といったような減点方式でオブザーバーにより採点される。減点数の合計により順位が決定する[6]。

3. Wheelie

(1) Wheelie とは

Wheelieは以下の手順で行うことができる。

- ① 腕を曲げた状態から、胴体が起き上がることにより腕が伸びる。
 - ② 腕が伸びることにより人間と自転車が一体となり、後方に回転し、前輪が上がる。
 - ③ ②の状態を維持したまま、後輪のみで走行する。
- 実際のWheelieの様子をFig.3-1に示す。



Fig.3-1 Steps for doing Wheelie

(2) Wheelie シミュレーションに必要なこと

Wheelie シミュレーションを行うには以下の手順が必要である。

- ① 腰部トルクの算出
- ② シミュレーションモデルの作成
- ③ 制御方法の考案

それぞれについて以下の項で説明する。

(3) 使用するパラメータ

今後シミュレーションで使用するモデルのパラメータを Fig.3-2 に示す。

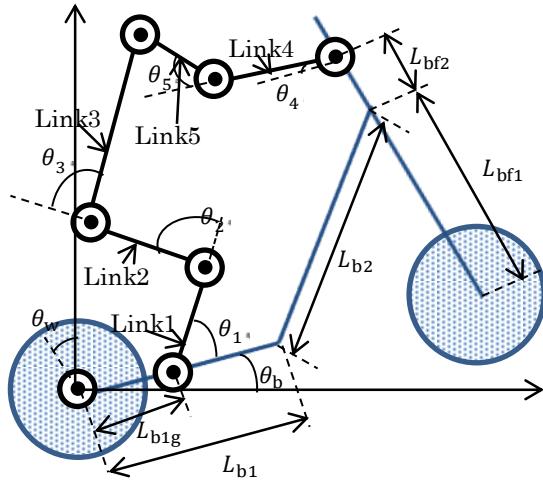


Fig.3-2 Definition of model parameters

(4) 腰部トルクの算出

前輪を上げる際、腰部にどれくらいのトルクをかける必要があるのか算出する必要がある。

最初に人間部と自転車部が一体となった状態から、合成重心位置が後輪の真上に来る時の角速度を計算する。これには、エネルギー保存則により、以下の式が成り立つ。

$$\frac{1}{2} I_b \omega_{\text{after}}^2 = m_b g l_g (1 - \cos \theta) \quad (3-1)$$

I_b : 後輪部を除いたモデルの後輪軸周りの慣性能率

ω_{after} : 衝突直後の角速度

m_b : 後輪を除いたモデルの質量

l_g : 後輪軸から合成重心までの距離

次に、一体となる前の腰部の角速度を算出する。衝突現象として見ると、一体となる前となる後では、角運動量は保存されるため、以下の式が成り立つ。

$$l_1 \omega_{\text{before}} = l_{\text{all}} \omega_{\text{after}} \quad (3-2)$$

l_1 : 胴体部の慣性能率 l_{all} : 人間+バイクの慣性能率

ω_{before} : 衝突前の胴体が持つ角速度

次に、一体となる前の腰部の角加速度を算出する。胴体が起き上がり、腕が伸ばされるまでに移動した角度を φ するとき、以下の式が成り立つ。

$$\omega_{\text{before}} = \alpha t \quad (3-3)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (3-4)$$

φ は初期位置により算出できる。

次に腰部トルクを算出する。腰部トルク T と角加速度の関係は以下のように定義されている。

$$T = I_1 \alpha \quad (3-5)$$

以上により、腰部トルクを算出できる。

(5) シミュレーションモデルを作成

シミュレーションを行う際、各リンクの挙動などが視覚的にわかる方が良いと考えている。したがって、今回は Interactive Physics 2005 を用いてシミュレーションを行う。このソフトはモデルを数式ではなく CAD のように実際に想像している形でモデルを製作できる。また、モータのコマンドには PD 制御則を適用可能で、リンクの角度やモータの出力などを.txt に保存し、実際のシミュレーションの様子をリアルタイムで視覚することができる。作成したシミュレーションモデルを Fig.3-3 に示す。今回のシミュレーションでは、5 章で述べる実験機に合わせて、後輪、膝関節、腰関節、肘関節の 4 つを駆動させる。

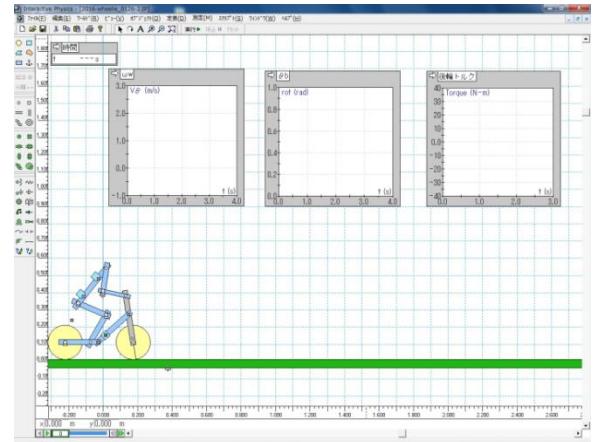


Fig.3-3 Simulation model by Interactive Physics 2005

(6) 制御方法の考案

Wheelie のシミュレーションを行う際、前輪を上げる過程と前輪を上げたまま走行する過程の 2 過程を行う必要がある。

前輪を上げる過程は、本章 (4) 節で述べたトルクと後輪の加速により前輪を上げることで実現できる[3][4]。

その後の走行に関しては後輪の加速、減速にて前輪上げ角度を調整することになる。その理由として、人間部の 3 つのモーダが同時に独立に駆動すると、閉リンクということから不安定な状態になりかねない。そこで、人間部には PD 制御、後輪には状態フィードバック制御によるトルク

をかけて Wheelie の実現を目指す.

(7) 運動方程式の導出

状態フィードバックゲインを算出するには状態方程式表示が必要であるので、まず運動方程式の導出を行う。運動方程式を導出する際、人間部に関しては、閉リンクモデルであることを考慮して導出しなければならない [3][4][7][8]。

A) 人間部の運動方程式の導出

使用するモデルを Fig.3-4 に示す。

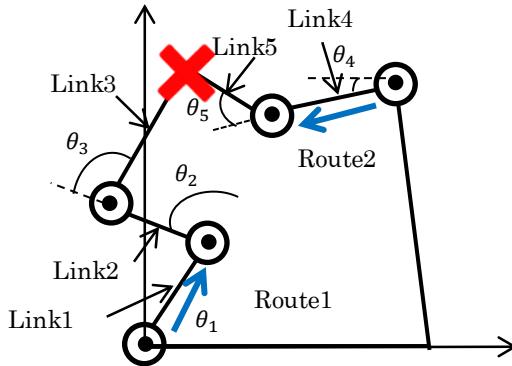


Fig.3-4 Five-link model of closed link mechanism

閉リンクを含む機構の運動については、パラレルメカニズムの逆動力学計算から導出することができる [3][4][7][8]。閉リンク運動方程式の導出方法は以下のようになる。

- ① 閉リンク機構を仮想的に切断点で切断する。
- ② 2本のリンク列それぞれについて、ヤコビ行列を求めること。
- ③ ヤコビ行列の拘束条件から、トルク変換ヤコビアンを算出する。
- ④ トルク変換ヤコビアンを用いて、リンクを仮想的に切断した開リンク機構のトルクを閉リンク機構一般化力に変換する。
- ⑤ 単位ベクトル法を用いて運動方程式を導出する。

B) 自転車部の運動方程式の導出

自転車部に関しては、開リンクと見なせるため、ラグランジュ法にて運動方程式を算出する。

各リンクの運動エネルギーの和とポテンシャルエネルギーの和をそれぞれ、 T 、 U とすると、ラグランジュ関数 L は以下のように定義できる。

$$L = T - U \quad (3-6)$$

各リンクのペアリングなどによる粘性抵抗の和を散逸関数 F とするとラグランジュ法より、以下の式が成り立つ。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_i} = \tau_i \quad (3-7)$$

$$i : w, b, 1, 2, 3, 4, 5$$

以上により自転車部の運動方程式が導出された。

(8) 運動方程式の線形化

前 (7) 項にて運動方程式を導出したが、非線形方程式であるため解析が困難である。そのため、安定している状態から変動が大きくなない場合には近似的に線形化して扱う。

非線形モデルの状態変数と入力をそれぞれ \mathbf{x}, \mathbf{u} とすると、一般的に次の式に表すことができる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (3-8)$$

モデルが安定している状態を $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ とすると、式(3-8)は以下のようない形で線形化できる [9]。

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (3-9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}_{(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)}$$

(9) 最適フィードバック制御

制御対象を式(3-9)としたとき、以下の評価関数を最小化することで状態フィードバックゲインを算出する方法を最適状態フィードバック制御と呼ぶ。

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{y}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt \quad (3-10)$$

ただし、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} は非負値な対称行列とする。このとき、 J を最小にする操作量は以下のようになる。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K} \mathbf{x}(t) \quad (3-11)$$

$$\mathbf{K} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (3-12)$$

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C} = 0$$

式(3-10)の計算は、MATLAB の lqr というコマンドにより計算できる。

(10) シミュレーション

シミュレーションを行う際、各モータの指令は以下のように設定した。

膝部、肘部：各リンクの目標角度に追従する PD 制御
 腰部：0~0.2 秒間は式(3-5)の値
 0.2~は胴体の目標角度に追従した PD 制御
 後輪部：0~0.05 秒間は出力なし。
 0.05~0.5 秒間は前輪上げ角度、前輪上げ角速度、
 後輪回転角速度を対象としたフィードバック
 制御
 0.5~は式(3-10)で求めた状態フィードバックゲ
 インを用いた状態フィードバック制御
 シミュレーション結果を Fig.3-5~Fig.3-6 に示す。

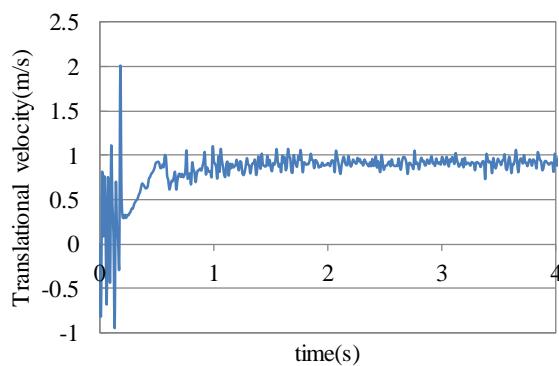


Fig.3-5 Translational velocity by IP 2005 simulation of the state feedback control

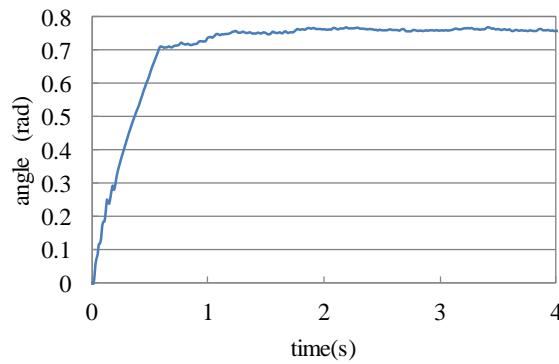


Fig.3-6 Rotation angle of Front wheel by IP 2005 simulation of the state feedback control

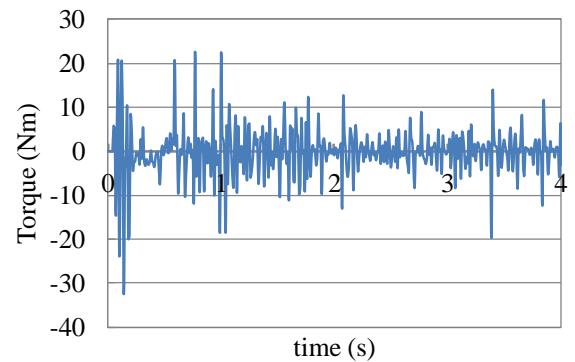


Fig.3-7 Torque of rear wheel of IP 2005 simulation of the state feedback control

Fig3-5において、状態フィードバックをかけた 0.5 秒以降は目標速度である 1.0 m/s 近辺で安定していることがわかる。

Fig3-6においては、0.5 秒の段階で目標角度に達していないため、目標角度に追従するように上昇し、その後は安定している。

Fig3-7において、トルクの値は実験機で実現可能な範囲で収まっていることがわかる。

4. Daniel

(1) Daniel とは

Daniel は以下のような手順で行うことができる[10]。

- ① 後輪を上げた状態で静止する
- ② 膝、腰関節を曲げ腰の位置を落とす。
- ③ 膝を伸ばしながら飛び上がり、自転車を引き寄せる。
- ④ 腰を落としながら後輪で着地する。
- ⑤ によって自転車と人間、すなわち合成重心での集中質量が地面から反力を受け加速跳躍すると見なせる。操作の様子を Fig.4-1 に示す。



Fig.4-1 Step for doing Daniel

(2) 跳躍の手順

跳躍をするには、以下の手順を経ることで跳躍可能と考えている。

- ① 離陸、着陸点の合成重心位置の決定。
 - ② ①の点を通るような合成重心軌道の決定。
 - ③ 離陸速度ベクトルの導出
 - ④ 最もしゃがんだ状態から離陸点までの合成重心軌道の導出
 - ⑤ ④を目標値として各関節の軌道の導出。
 - ⑥ ⑤を目標値とした各関節の制御。
- 今回は③、⑤について導出を行った。

(3) 離陸速度ベクトルの導出

Danielにおいて、離陸するときに目標値まで届く速度を持たなければならない。なので、離陸速度ベクトルの導出が必要となる。跳躍のイメージを Fig.4-2 に示す。

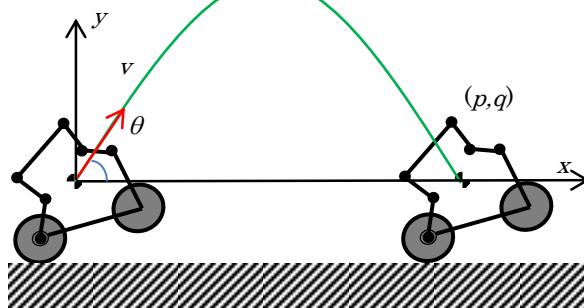


Fig.4-2 Mass center trajectory while jumping to a target position

Fig.4-2において、重心軌道は以下のように定義できる。

$$q = p \tan \theta - \frac{g}{2v^2 \cos^2 \theta} p^2 \quad (4-1)$$

しかし、式(4-1)は未知数が 2 つあり、放物線が無数に存在する。その中から 1 つの放物線を選ぶ必要がある。

A) 初期位置と目標位置が同じまたは低い場合

式(4-1)において、 v が最小となるときは以下のときである。

$$\begin{aligned} \sin(2\theta - \alpha) &= 1 & (4-2) \\ \sin \alpha &= \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2}} & \cos \alpha &= \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}} \end{aligned}$$

式(4-1)および式(4-2)により算出できる。

B) 初期位置より目標位置のほうが高い場合

この場合、A)のやり方では、モデルの最下点が目標位置に届かない場合がある。したがって、合成重心位置とモデルの最下点の距離 r を考慮する必要がある。その方法として、式(4-1)を v について解き、 r を考慮すると以下のようになる。

$$v = \sqrt{\frac{p^2 g}{\sqrt{p^2 + (q+r)^2} \sin(2\theta - \alpha) - (q+r)}} \quad (4-3)$$

式(4-2)と式(4-3)により算出できる。

(4) 合成重心位置を満たす関節角度の導出

Danielを行うためには、合成重心位置から関節角度を求める逆運動学の計算が必要となる。ここでは、人間部だけで考える。使用するモデルを Fig.4-3 に示す。

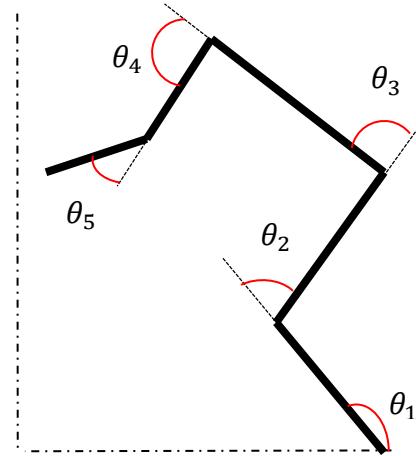


Fig.4-3 Simulation model for joint trajectory generation

今回のモデルは足先がペダルに固定されていて、手先がハンドルに固定されているので、閉リンクで考えなければならない。このことから、手先位置と目標重心位置から関節角度を求める必要がある。しかし、未知数が 5 個に対して式が 4 つしかなく、さらに、手先位置と関節角度の関係、重心位置と関節角度の関係は非線形の形で表されるため、一意に定めることができない。なので、ニュートン・ラブソン法にて関節角度を求める[11]。

$$\theta^{k+1} = \theta^k + J(\theta^k)^+ [G - f_k] \quad (4-4)$$

$J(\theta^k)$: θ^k の時のヤコビ行列

G : 目標手先位置、重心位置

f_k : θ^k の時の手先位置、重心位置

式(4-4)にて、ヤコビ行列は順運動学にて求めることができる[12]。目標重心位置から現在の重心位置を引いたものが、許容誤差の範囲内になれば計算を終了し、関節角度を求めることができる。しかし、初期位置と目標位置の関係により、収束しない場合がある。そのため、式(4-4)の計算をした後に手先位置から関節角度を求める式をニュートン・ラブソン法に求めることにより、広い範囲で収束可能となっている。

また、ヤコビ行列を以下のように重み行列を加えることにより、関節角度の動きを制限することができる[13]。

$$J \triangleq W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T) \quad (4-5)$$

実際に初期角度 θ_0 と目標重心位置 G_G と重み W を以下のように設定して計算を行った。得られた関節変数を使用したモデルの状態を Fig.4-4 に示す。ただし、各リンクの質量、長さは 1 として計算している。

$$\theta_0 = [50, 20, 30, 20, 30]^T \quad (4-6)$$

$$G_G = [0.35, 1.75]^T \quad (4-7)$$

$$W = diag[1 \ 1 \ 1 \ 8 \ 1] \quad (4-8)$$

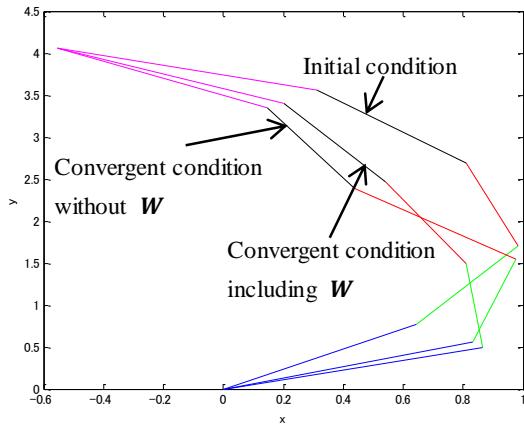


Fig.4-4 Mode attitudes before and after convergent calculation of five-link model

Fig.4-4 から、手先位置が固定されたまま関節角度が定まっていることがわかる。また、順運動学から重心位置を計算してみると、重み W がありの時もなしの時も、目標の重心位置から 0.001~0.02 程度の誤差しか生じていないことが分かった。この誤差はリンクの長さを 1m と考えると、1mm~20mm の誤差である。さらに、重みをかけた肩関節の部分を見ると、重みをかけたときのほうが初期姿勢と近いことがわかる。実際の数値として、重みなしの時の肩関節の角度は -15.6° 、重みありの時の角度は 4.3° となっている。

5. ロボットの設計、製作

実験的に Daniel などの解析を行うため、バイクトライアルロボットの設計、製作を行う。縮尺は実際販売しているバイクトライアル用自転車や市販自転車の乗員体重の 2/5 程度である。

(1) 自転車部

ECHO 2011_MK2 の形状をもとに各部の寸法を決定した。モデルとした自転車とロボットの寸法を Table.5-1 に示し、自転車部の名称を Fig.5-1 に示す。

Table.5-1 Parameters of reference model and bike-trial robot

Part	Reference Model	Bike-trial robot
Wheel	20 (in)	8 (in)
Wheelbase (mm)	1010	400
Chain Stay (mm)	351	140
BB Up (mm)	80	0
Head Angle (deg)	72	85



Fig.5-1 Define of each part of a bicycle

実際に設計した自転車部を Fig.5-2 に示す。各フレームの材料として、アルミ合金チャンネル材を使用している。軸に関しては後輪には直径 10mm の、前輪には直径 8mm のステンレス鋼を使用している。タイヤには A-Bike city の 8in のタイヤを使用している。直径が違う理由として、タイヤは前輪と後輪で細部が違う形をしているからである。前輪は直径 8mm のペアリングが搭載されているため、8mm を採用した。後輪は、8mm の穴が開いていたが、材料が鉄だったため、10mm に加工した。

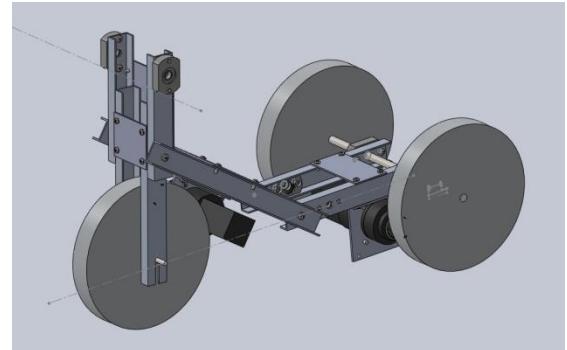


Fig.5-2 A design of the bicycle drawn by Solid Works 2013

(2) 人間部

人間部は前腕、上腕、胴体、大腿、下腿からなっている。各部分の人体寸法、およびそれに基づいて作成した人間部の寸法を Table.5-2 に示す。

実際に設計した人間部を Fig.5-3 に示す。各リンクの材料や軸は自転車部と同じものを使用している。しかし、腰部の関節軸は、腰部トルクにて前輪を上げる際の軸撓みを少なくするため、 $\phi 12\text{mm}$ にしている。

Table.5-2 Parameters of anatomy and bike-trial robot

Part (mm)	Anatomy	Bike-trial robot
Front Arm	326	130
Upper Arm	326	130
Body Region	635	255
Thigh	435	175
Leg Legion	435	175

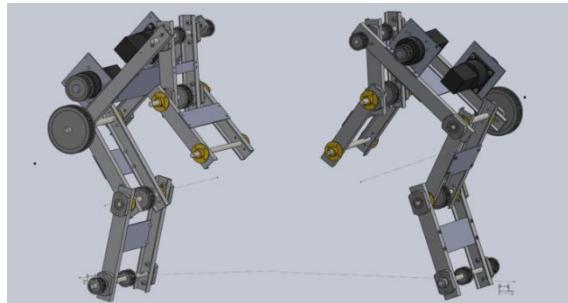


Fig.5-3 Designed images of human drawn by Solid Works

(3) 駆動系

今回のモデルは後輪、膝部、腰部、肘部の4つを駆動させる。アクチュエータには安川電機製ACサーボモータを使用し、減速機には減速比50のハーモニックドライブ製のものを使用している。その後、ブーリー、タイミングベルトを経て駆動軸に動力を伝える。これらの各仕様をTable.5-3に示す。実際に製作したロボットをFig.5-4に示す。

Table.5-3 Specs of the driving systems

	Rear wheel	Knee	Elbow	Waist
Gear Ratio at Belt	1:1	32:48	←	8:15
Overall Gear Ratio	1:50	1:75	←	4:375
Output Shaft Torque (Nm)	27.85	41.8	←	52.219
Output Shaft Speed (rpm)	120	80	←	64



Fig.5-4 The bike-trial robot

各モータに電流を流したところ、しっかりと駆動しているのが確認できた。

(4) 各関節の制御

曲技を実際にロボットで再現するには、各関節を目標角度に追従するようにモータに指令を与えなければならぬ。本ロボットの角度制御系の構成をFig.5-5に示す。

D/A変換機にはInterface社PCI-3343Aを用い、 $\pm 10V$ の範囲で偏差信号に応じた指令を行う。Power ampには安川電機のSGDV-R70Fを用い、D/A変換機から入力された指令電圧を電流に変換し出力する。コントローラは今回作成したプログラムである。過去に4つのモータを同時に駆動させるプログラムが作られている[5]ので、そのプログラムをバイクトライアルロボット用に拡張、改造を行った。実際に各モータに指令を与えた様子をFig.5-6に示す。

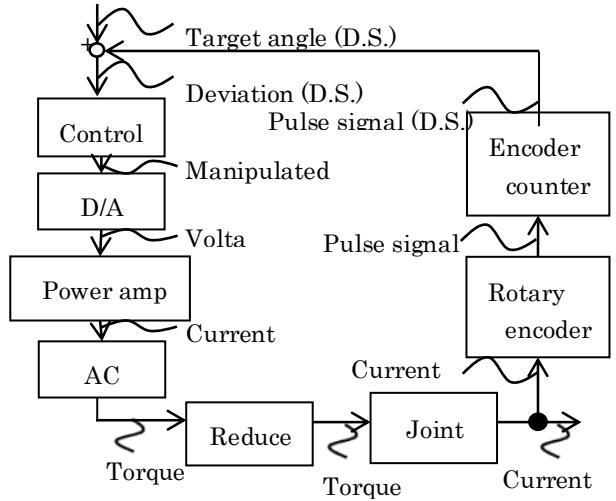


Fig.5-5 Hardware construction chart of feedback control systems

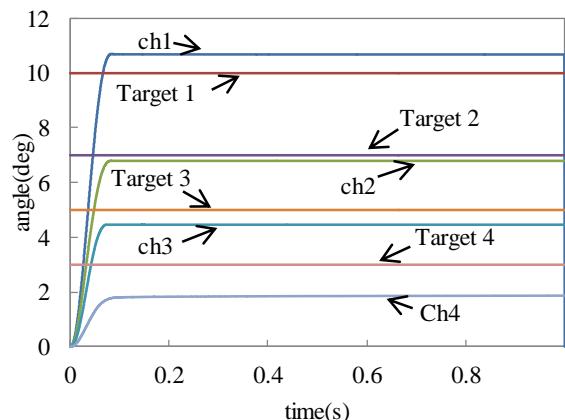


Fig.5-6 Step responses of joint angles by PD controller

6. おわりに

7リンクモデルのWheelieシミュレーションに関しては、加速することなく安定した走行が実現できた。今後、より安定した走行を行う必要があるならば、前輪を上げるまで

の制御方法を考案する必要がある。

閉リンクモデルに対して関節角の軌道生成が実現できた。今後、重み行列などを用いて、関節角度の制限を表現する必要がある。

ロボットの製作については、ロボットを製作し、駆動確認もできた。今後、Wheelie などを行うプログラムを作成し、実際のロボットにて曲技の実現を行う必要がある。

謝辞 本研究の遂行にあたり終始御指導いただきました、法政大学理工学部機械工学科 高島俊教授には、深く感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) AI&ROBOT

<http://ai2001.ifdef.jp>

2) 村田製作所 HP

http://www.murata.co.jp/corporate/boy_girl/index.html

3) 渋谷純也、高島俊 “マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究”，法政大学修士論文，2007

4) 松岡美樹、高島俊，“マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究”，法政大学修士論文，2010

5) 重藤文彬、高島俊 “マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究”，法政大学修士論文，2013

6) 国際バイクトライア協会 HP

<http://www.bju.jp/>

7) 中村仁彦、パラレルメカニズムの動力学、日本ロボット学会誌, vol.10,no.6,pp,709-714,1992

8) 中村仁彦、構造変化を伴うリンク系の動力学計算とヒューマンフィギュアの動力学計算、日本ロボット学会誌, vol.16,no.8,pp,1152-1159,1998

9) 増淵正美、システム制御、コロナ社,

10) お気楽！自転車試行

<http://www.katch.ne.jp/~isog/>

11) 鈴木誠道他、現代数値計算法、オーム社

12) 吉川恒夫、ロボット制御基礎論、コロナ社

13) 三武祐玄、手先移動制御について