

マウンテバイク を用いた曲技ロボットの研 究：跳躍のため関節軌道生成および実験機 試作

重藤, 文彬 / SHIGETOH, Fumiaki

(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)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010309>

マウンテンバイクを用いた曲技ロボットの研究 —跳躍のための関節軌道生成および実験機の試作—

Study of an Acrobat Robot Using Mountain Bike

-Joint Trajectory Generation for the Maneuver Daniel and production of a Prototype Model -

重藤 文彬

Fumiaki SHIGETOH

指導教員 高島俊

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

As one field of sports, there is a game of bike trial. Riders operate a mountain bicycle with various advanced techniques. The purpose of this research is to create a bike trial robot that can operate a mountain bicycle and perform various maneuvers such as Daniel (jumping), bike wheelie and etc. In this paper, it is studied how to generate the joint trajectory for maneuvers, for example, Daniel. The prototype physical model of bike-trial robot is designed and constructed for experiments.

Key Words: Bike Trial, Mountain Bicycle, Maneuver Robot, Daniel, Joint Trajectory Generation

1. 諸 言

近年、多くの研究機関において人型や車輪型、飛行型をはじめ多種の移動ロボット研究が行われている。自転車型ロボットにおいても様々な研究機関において研究されており、そこでは漕ぎ動作による完全自立の安定走行、不倒停止などが実現されている。しかしながら、岩がごろごろした山道や岩場といった不整地走行を実現した例はまだない。そこで、本研究ではバイクトライアル競技をモデルとし、これら不整地を自由自在に乗りこなす事を可能とするバイクトライアルロボットの開発を目指す。このロボットは、歩行ロボットの移動速度を人間並みに上げることが難しい、車輪式ロボットの限られた不整地しか走行できない、といった欠点を補うことになり、高い不整地走破性を期待できる。

これまでの松岡らの研究において、人と自転車の7リンクモデルを生成し、適切な関節トルクを加えることにより跳躍が可能であることが確認されている。そこで、現在地点と任意の目標地点に応じた目標関節軌道を生成し、目標地点への跳躍を目指した。また、3次元での具体的な検討に向け実験機の製作を行った。

2. バイクトライアルについて⁴⁾

バイクトライアルは BIU/BJU 2011 バイクトライアル競技規則において、「特殊な自転車を用いて行われるス

ポーツで、減点数をできるだけ少なくするよう努めながら自然または人工の難しいセクションを定められた時間内に走破する競技」とある。すなわち、セクション内に置かれた岩、丸太、ブロックおよび渓谷や山地といった既存の地形による障害のあるコースを、足をつかずにできるだけ早く通過するというものである。審判はオブザーバーと呼ばれる。1回足を地面に着くと1点減点、2回着くと2点減点、3回と4回は3点減点、5回以上足を着くか両手を同時に着いた場合は失格の5点減点といったように、減点方式でオブザーバーにより採点され、点数により順位が決まる。コースを走破するには安定走行だけでなく、ジャンプなど様々なテクニックが必要とされる。

(1) 使用自転車の規定

BIU/BJU 2011 バイクトライアル競技規則において、競技会において使用される自転車は、20インチ、または26インチの自転車と定められている。本研究では20インチを基準とする。

(2) 主な曲技

本研究の対象としている、不整地走行に最低限必要と思われる曲技について簡単に説明する。

a) Front-Up

前輪を上げる動作の総称。漕ぎ動作による地面からの反力によるモーメントを用いる方法、漕がずに上体を起

こし、腕によりハンドルを引き上げる力によるモーメントを用いる方法、および、その両方を用いる方法がある。前輪を上げ静止した状態では、人と自転車の合成重心は後輪接地点上にある。



Fig.1 Image of Front Up

b) Wheelie

Front-Up の状態のまま走行する動作。この状態にあるとき、重力と慣性力の合力および地面反力は同じ大きさであり、作用線は同一直線上にある。また、地面反力の作用点は後輪接地点にある。

c) Daniel

Front-Up の状態からジャンプし、後輪で接地する動作。膝を伸ばす動作により床から反力を受け後輪を上昇させる。



Fig.2 Image of Daniel

3. パラメータ

今回用いるパラメータを Fig.1 のように定義する。

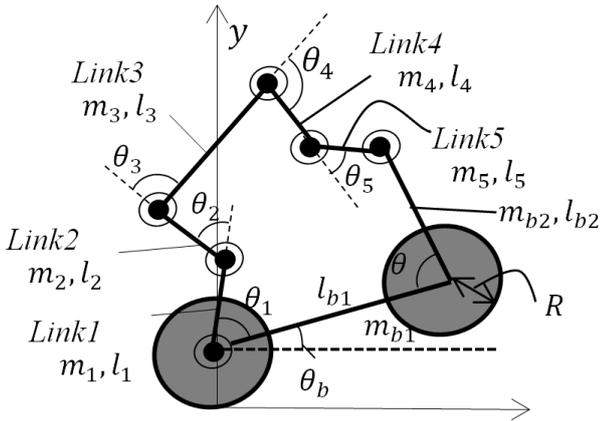


Fig.3 Link model structure and parameters

4. 跳躍のための関節軌道生成

これまでの研究において、後輪と膝関節、腰関節、肘に適切なトルク T_w , T_2 , T_3 , T_5 を与える事により跳躍が可能なことは確認されている¹²⁾。各トルクは回転角度と回転角速度をフィードバックしており、以下の PD 制御則

により与えられる。

$$T_w = k_{pb}(\theta_{bt} - \theta_b) + k_{db}(\dot{\theta}_{bt} - \dot{\theta}_b) \quad (1)$$

$$T_2 = k_{p2}(\theta_{2t} - \theta_2) + k_{d2}(\dot{\theta}_{2t} - \dot{\theta}_2) \quad (2)$$

$$T_3 = k_{p3}(\theta_{3t} - \theta_3) + k_{d3}(\dot{\theta}_{3t} - \dot{\theta}_3) \quad (3)$$

$$T_5 = k_{p5}(\theta_{5t} - \theta_5) + k_{d5}(\dot{\theta}_{5t} - \dot{\theta}_5) \quad (4)$$

本研究においては、任意の目標地点および現在地点に応じた回転角度及び回転角速度の軌道を導出し、目標地点への跳躍を目指す。

(1) 目標関節軌道生成の手順

目標関節軌道の生成および制御は以下の手順を経る。

- ① 離陸、着地点の合成重心座標決定。
- ② 上記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 合成重心最下点(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。

この他に空中での姿勢制御、着地へ向けた姿勢制御を考慮する必要がある。

(2) 離陸速度ベクトル導出の概略

人と自転車の合成重心は、Daniel により飛び出したのちは重力以外の外力は受けない。したがって、水平方向の運動量は保存し、合成重心の軌道は放物軌道となる。これは、飛び出し時には、目標地点への跳躍に必要な速度の大きさと角度を持っていないことを意味する。この離陸速度ベクトルは、二次関数の一般式および放物運動の軌跡の一般式に、離陸時の合成重心位置、目標地点の合成重心位置を適用することによって導出できる。但し、この方法は並進運動のみを考慮しており、場合によっては合成重心周りの回転も考慮する必要があると考える。

(3) 合成重心位置を満たす関節角度の導出

目標関節軌道を求める過程において、合成重心位置から、その位置を満たす関節変数を求める逆運動学計算を要する。

a) 順運動学計算

逆運動学計算の前に、まずは関節変数から重心位置を求める順運動学計算に触れる。本モデルの人体部は足先から手先にかけて直鎖状リンクから成る為、手先位置 $\mathbf{x}_T = [x_T \ y_T]^T$ および人体部の重心位置 \mathbf{x}_G は、関節変数ベクトル $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$ をして、

$$\mathbf{x}_T = f(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 l_i \cos\left(\sum_{j=1}^i \theta_j\right) & \sum_{i=1}^5 l_i \sin\left(\sum_{j=1}^i \theta_j\right) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_G = g(\boldsymbol{\theta}) = [x_G \ y_G]^T \quad (6)$$

と書ける。ただし、

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(l_{gi} \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) + \sum_{k=i}^{i-1} l_k \cos \left(\sum_{m=1}^k \theta_m \right) \right)}{M} \quad (7)$$

$$y_G = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(l_{gi} \sin \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) + \sum_{k=i}^{i-1} l_k \sin \left(\sum_{m=1}^k \theta_m \right) \right)}{M} \quad (8)$$

$$M = \sum_{i=1}^5 m_i \quad (9)$$

である。また、関節角度と手先速度 $\dot{\mathbf{x}}_T$ および重心速度 $\dot{\mathbf{x}}_G$ との間には、

$$\dot{\mathbf{x}}_T = \mathbf{J}_T \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (11)$$

の関係がある。なお、

$$\mathbf{J}_T(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_T}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_T}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_T}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x_T}{\partial \theta_5} & \frac{\partial x_T}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial y_T}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_T}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_T}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y_T}{\partial \theta_5} & \frac{\partial y_T}{\partial \theta_6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{J}_G(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_G}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_G}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_G}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x_G}{\partial \theta_5} & \frac{\partial x_G}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial y_G}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_G}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_G}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y_G}{\partial \theta_5} & \frac{\partial y_G}{\partial \theta_6} \end{bmatrix} \quad (13)$$

である。

b) 逆運動学計算

関節軌道を求めるには、任意の重心位置を満たす関節角度を求める必要がある。ここでは、その逆運動学計算について述べる。

重心速度が $\dot{\mathbf{x}}_G$ であるとき、この重心位置を満たす関節角速度は、式(11)の \mathbf{J}_G が正則であれば、

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_G^{-1} \dot{\mathbf{x}}_G \quad (14)$$

と表される。ここで、 \mathbf{J}_G^{-1} はヤコビアン の逆行列を表す。しかしながら、本モデルにおけるヤコビアンは 2×5 の行列である為、逆行列を持たない。そこで、疑似逆行列を用いる。疑似逆行列 \mathbf{J}_G^+ を用いると式(14)は、

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_G^+ \dot{\mathbf{x}}_G \quad (15)$$

と書ける。ただし、

$$\mathbf{J}_G^+ = \mathbf{J}_G^T (\mathbf{J}_G \mathbf{J}_G^T)^{-1} \quad (16)$$

である。この関係を用い、ある重心位置を満たす関節角

度を収束計算により求める。

開リンク、すなわち手先位置とハンドル位置が固定されていないとして考える。重心位置の微小変化量は、

$$\begin{bmatrix} \Delta x_g \\ \Delta y_g \end{bmatrix} = \Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}_G \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (17)$$

となる。ここで、現在の合成重心位置を \mathbf{x} 関節角度を $\boldsymbol{\theta}$ 、微小時間後のこれら目標値を \mathbf{x}' 、 $\boldsymbol{\theta}'$ とすると、

$$\boldsymbol{\theta}' = \boldsymbol{\theta} + \Delta \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} + \mathbf{J}_G^+ [\mathbf{x}' - \mathbf{x}] \quad (18)$$

となる。なお、 \mathbf{J}_G は $\boldsymbol{\theta}$ の関数なので、 $\boldsymbol{\theta}$ が変化すれば \mathbf{J}_G も変化する。したがって、(18)式はある $\boldsymbol{\theta}$ の近傍でのみ成立つため $\boldsymbol{\theta}$ の刻み幅は十分小さい必要がある。

《計算例》

関節角度の初期値を、

$$\boldsymbol{\theta} = [30^\circ \ 100^\circ \ -80^\circ \ 90^\circ \ 60^\circ]^T$$

とすると、順運動学計算により重心および手先位置の初期値はそれぞれ、

$$\mathbf{x}_G = [185 \ 277]^T, \quad \mathbf{x}_T = [398 \ 529]^T$$

となる。目標合成重心位置を

$$\mathbf{x}_G' = [130 \ 200]^T$$

とすると、収束計算後の各関節角度は、合成重心および手先位置は、

$$\boldsymbol{\theta} = [86^\circ \ 44^\circ \ 72^\circ \ 48^\circ \ 63^\circ]^T$$

となる。また、順運動学により重心位置および手先位置を求めると、

$$\mathbf{x}_G = [130 \ 200]^T, \quad \mathbf{x}_T = [337 \ 250]^T$$

となり、重心位置が目標重心位置に収束していることが確認できる。Fig.4には初期状態および収束後のリンクの状態を示している。

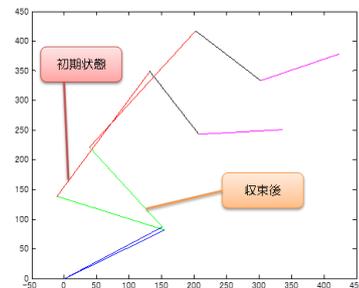


Fig.4 Before and after convergent calculation of 5-link model

この開リンクの計算方法に拘束条件を適用、また、収束条件の変更により、閉リンク、すなわち手先位置をハ

ンドル位置に拘束しての関節角度導出を試みる。

5. 実験機の製作

シミュレーション結果の検討を行う為の実験機を製作した。おおまかには自転車と人体部から成り、縮尺は2/5である。設計については、所要の動作を為し得る性能を持たせることは勿論であるが、軽量であること、製作・整備が容易となることも考慮した。

(1) 自転車

a) フレーム

自転車の寸法は ECHO 2011-MK2 を参考とした。この自転車の主要寸法および、その寸法に基づいて決定した実験機の寸法を Table1 に示す。なお、各部の名称は Fig. 5 の示すとおりである。

Table1 Parameters of reference model and prototype model

Part	Reference Model	Prototype Model
Wheel	20 (in)	200 (mm)
Wheelbase (mm)	1010	400
Chain Stay (mm)	351	140
BB Up (mm)	80	0
Head Angle (deg)	72	85



Fig.5 Define of each part of a bicycle

設計した実験機自転車を Fig.6 に示す。車輪にアルミ合金平板、軸に S45C, その他部分にはアルミ合金チャンネル材を用いている。

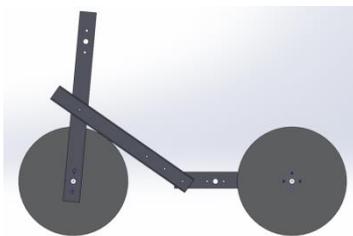


Fig.6 Design of bicycle

b) 駆動系

自転車は後輪駆動とする。アクチュエータには 50W の安川電機製 AC サーボモータを用い、減速機、タイミングプーリおよびタイミングベルトを用いて動力伝達を行う。なお、減速機にはハーモニックドライブを用いたが、

これは小型軽量で高減速比が得られる為である。これら仕様を Table2 に示す。

Table2 Spec of drive system

Motor	Servomotor Model		SGMJV-A5ADA21
	Rated Output (W)		50
	Instantaneous Peak Torque (Nm)		0.557
	Max. Speed (rpm)		6000
Reducer	Harmonic Drive Speed Reducer		CSG-14-50-GH-J2ACD
	Reduction Ratio		1 : 50
Pulley	Number of Pulley Teeth	Input Shaft	32
		Output Shaft	32
	Reduction Ratio		1 : 1
Overall Gear Ratio			1 : 50
Output Shaft Torque (Nm)			27.85
Output Shaft Speed (rpm)			120

c) 自転車組立

以上に基づき製作した実験機を Fig.7 に示す。

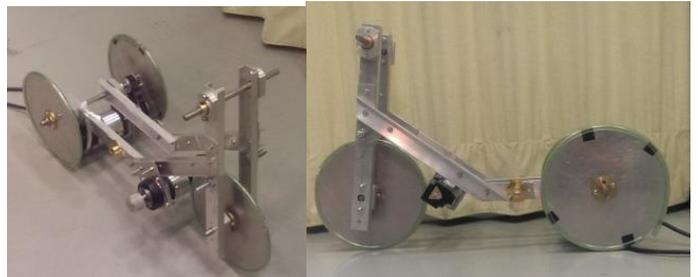


Fig.7 Bike part of the prototype model

(2) 人体部

a) 構体

人体部分は下腿、上腿、胴体、上腕、前腕からなる 5 リンクとして製作する。これら部位の人体寸法および、その寸法に基づき決定した実験機人体部寸法を Table3 に、外観を Fig.8 に示す。

Table3 Parameters of anatomy and prototype model

Part	Anatomy	Prototype Model
Front Arm (mm)	326	130
Upper Arm (mm)	326	130
Body Region(mm)	635	255
Thigh (mm)	435	175
Leg Legion (mm)	435	175

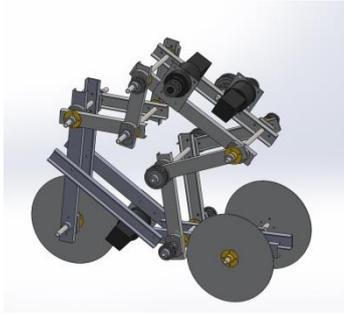


Fig.8 Design of bike trial robot

b) 駆動系

人体の姿勢を一意に定めるには3カ所の関節を制御すればよい。本機では、膝、腰、肘関節を制御する。アクチュエータには50Wの安川電機製ACサーボモータを用い、減速機、タイミングプーリおよびタイミングベルトを用いて動力伝達を行う。これら各仕様をTable4に示すが、サーボモータおよび減速機は自転車部と同一の物を用いるため、そちらも参照されたい。質量バランス、設置スペースを考慮し、膝駆動用アクチュエータは自転車に、腰、肘駆動用アクチュエータについては胴体に設置した。

Table4 Spec of drive systems

	Joint		
	Knee	Elbow	Waist
Gear Ratio at Belt	32 : 48	←	1 : 2
Overall Gear Ratio	1 : 75	←	1 : 100
Output Shaft Torque (Nm)	41.8	←	55.7
Output Shaft Speed (rpm)	80	←	60

(3) 実験機全体

自転車と人体を組み合わせた様子をFig.9に示す。なお、実験機総質量は10.2kgとなった。



Fig.9 Bike trial robot

(4) 関節角度の制御

a) 関節角度制御系の構成

関節角度制御系の構成をFig.10に示す。

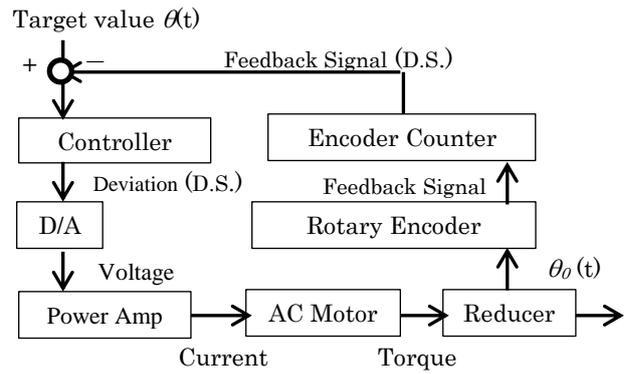


Fig.10 Flowchart of control

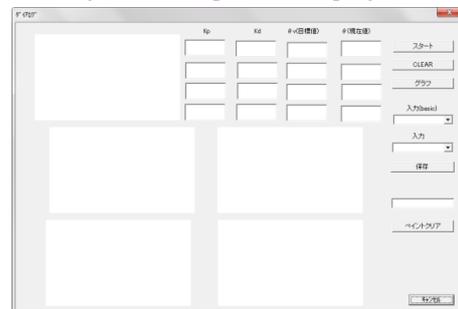
DA変換機にはInterface PCI-6201Eを用い±10Vの範囲で指令を行う。パワーアンプには安川電気SGDV-R70Fを用い入力された電圧に応じた電流を出力する。また、エンコーダカウンタにはInterface PCI-3343Aを用い、エンコーダで生成され、アンプを介して送られるパルス波のカウントを行う。

b) 制御プログラム

研究室既存のプログラムを基に、モータ制御プログラムを製作した。このプログラムは4軸をそれぞれ異なるパラメータ、目標値を用いて制御可能なものであるが、関節制御モータについては角度制御、自転車制御モータについては角度制御または速度制御の機能を持つ。また、各関節の時間応答をcsvファイルに出力することができる。Fig.11にプログラムの実行画面を示す。またFig.12は目標値入力による制御例である。初めに角度を原点に制御しておき、その後目標角度20度、比例ゲイン10、微分ゲイン0.1としとして制御を行ったが、回転角度が目標角度に追従していることがわかる。

このプログラムに跳躍のための制御側を適用し、曲技動作を目指していく。

Fig.11 Control panel of the program



(4) 関節角度の制御

a) 関節角度制御系の構成

関節角度制御系の構成をFig.10に示す。

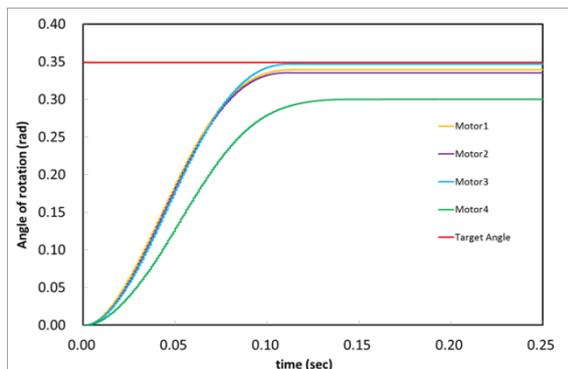


Fig.12 Time response with PD control (kp=10,kd=0.1)

6. おわりに

本研究では、バイクトライアルロボットについて、Daniel による任意の目標地点への跳躍を目指し、その動作を可能とする目標関節軌道の導出について検討を行い、また、バイクトライアルを実現するための実験機を試作した。

ハードウェアの部分は概ね完成したといえるが、改善すべき課題として、ベルトの緩みや軸に対するプーリの緩みによる駆動不良、車輪のグリップ力の弱さが挙げられる。ベルトの緩みは人体の関節駆動系、とりわけ腰関節に顕著にみられる。これは、機構の剛性が低く、軸間距離が変化する為と考えられる。適宜、補強を加えることで改善は図れるが、重量増や動作支障には十分注意する必要がある。また、プーリの滑りは軸に平取りを設けることにより改善が図られるが、位置合わせには精度を要する。車輪グリップ力の弱さは、実験室床材によるものと考えられる。急加減速はもとより、跳躍、着地時のグリップは曲技を行う上で重要であり、何らかの対策が必要と考える。

今後、バイクトライアルの曲技を具体的にやっていくには、自転車の前輪上げ角の取得が必要となる。傾斜角度センサの搭載が望ましいであろう。また、近年 3D プリントが注目されている。これを用いれば主要な構造部品からシャフトやモータを支持する細かな部品までを一体として制作でき、接合部の減少や部品点数の削減により精度の向上、軽量化が図れる可能性がある。

ソフトウェアについては、各軸を独立に PD 制御を行うプログラムを製作し、実験を行った。

この方法でより厳密な制御を行うならば、重力補償を加える必要がある。具体的に曲技を行っていくには、

いかなる制御則を用いるにせよ適切な目標値を導出しなければならない。

本研究では、目標値を求める過程で必要となる、ある成重心位置を満たす関節角度の導出について、収束計算を用いる方法を検討した。開リンク、すなわち手放しの状態においては重心位置を満たす関節角度の導出が可能であることが確認された。しかしながら、閉リンク、すなわち、人がハンドルを握った状態については、簡易的な方法の検討は行えたが、厳密な方法の導出には至っていない。この導出が可能となれば目標関節軌道が生成でき、任意の目標地点への跳躍に向けた具体的なシミュレーション、実験機での検討が可能となる。

本研究のバイクトライアルロボットが実現し、不整地を自在に走行することができれば、その様子には多いにインパクトがあり、アミューズメントロボットとしては大いに成功と言えるであろう。さらに、実用的な方面についても、本ロボットの不整地走破性能は山での遭難者捜索や災害現場の急な階段や瓦礫の山の通過に大いに役立つ。また、福祉の面においても、パワーアシスト車いすの転倒防止制御などにも本技術が適用できると考える。

謝辞：本研究の遂行にあたり様々な御指導をいただきました。法政大学理工学部機械工学科 高島 俊 教授には、この場を借りて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) 渋谷純也, マウンテンバイクを用いた曲技ロボット, (2007), 法政大学大学院工学研究科修士論文
- 2) 松岡美樹, バイクトライアルロボットのための力学的解析とシミュレーション, (2010), 法政大学大学院工学研究科修士論文.
- 3) 自転車・歩行者混合交通のモデルに用いる自転車の加速度測定に関する研究, (2010), 土木学会西部支部研究発表会
- 4) 国際バイクトライアル協会 HP より <http://www.bju.jp/>