

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420200

研究課題名(和文) 6脚ロボットの歩行環境適応型胴体6自由度運動制御手法の開発

研究課題名(英文) Development of 6-degrees-of-freedom motion control method for a six-legged robot based on adjusting to walking environment

研究代表者

内田 洋彰 (UCHIDA, Hiroaki)

木更津工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：00223561

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：6脚ロボットの胴体6自由度(胴体重心位置 $x, y$ , ヨー角, 胴体高さ, ピッチ角, ロール角)を制御する手法の検討を行った。胴体重心位置 $x, y$ ヨー角を制御する手法として歩行方向制御手法, 胴体高さ, ピッチ角, ロール角を制御する手法として姿勢制御手法を支持脚の脚リンクに与えることで目標軌道に対する追従性能の向上をはかった。提案する胴体6自由度制御手法の有効性は6脚ロボットの3DCADモデルを用いた3Dシミュレーションにより, 高さ50mmの段差を乗り越える歩行により確認した。

研究成果の概要(英文)：The development of the six-degrees-of-freedom (body position of the center of gravity  $x, y$ , yaw angle, body height, pitch angle, roll angle) control method for a six-legged robot was carried out. The walking directional control method as a control method for the  $x$ -,  $y$ -directions and yaw angle was applied, and the posture control method as a control method for the body height, pitching angle and the rolling angle was applied. Both feedback (FB) control were applied to the support legs, and we aimed to improve the following performance for the target trajectory. Effectiveness of the proposed 6-degree-of-freedom control method was verified by 3D simulations using the 3DCAD model of the six-legged robot in the case that the six-legged robot overcame the bump of height level 50mm.

研究分野：ロボット工学, 制御工学

キーワード：6脚ロボット 胴体6自由度制御 歩行方向制御 姿勢制御 軌道追従制御 不整地歩行

### 1. 研究開始当初の背景

多脚ロボットは車輪型の移動ロボットと比較すると対環境性に優れており、原子炉内、地雷原、惑星探査など人間が作業するには困難な環境下で活躍すると考えられている。東日本大震災以降では、原子力炉内、瓦礫処理等極限環境下での活躍が期待されている。報告者はこれまでの研究で、広瀬らが提案する歩行ロボットの脚機構として移動速度を発生するリンク(旋回部)と力(ロボットの自重を支える)を発生するリンク(腿部)をそれぞれ別にする機構が4脚以上の多脚ロボットの姿勢制御には有効であることに着目し、この機構を有する6脚ロボット(Fig.1)を用いて胴体高さ、ピッチ角およびロール角の3自由度を制御する姿勢制御手法を中心に検討してきた。しかし、胴体重心位置(x,y)およびヨー角の3自由度を制御する歩行方向制御に関してはほとんど研究がなされていなかった。Fig.1で示される6脚ロボットにおいて、旋回部のみでの全方向歩行制御では、進行方向に対して垂直方向の変位を大きくとることができない問題点があった。

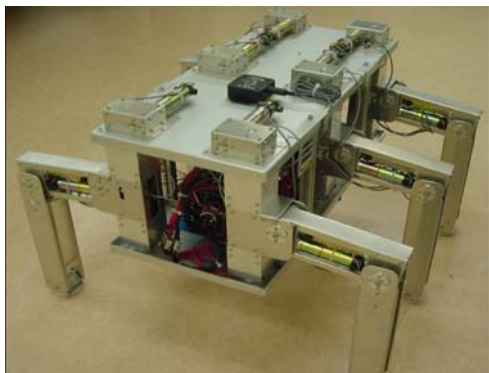


Fig.1 Six-legged robot

### 2. 研究の目的

研究開始時の第1の目的は仮想インピーダンスを設定した6脚ロボットの歩行方向(歩行方向 x, y およびヨー角)制御手法の開発、第2の目的は、歩行方向制御において、FF入力を用い、ウォームギヤ駆動の応答性を改善する運動制御手法の開発、第3の目的は、仮想インピーダンスを設定した姿勢制御(胴体高さ、ピッチ角、ロール角)と歩行方向制御手法の協調制御とした。

### 3. 研究の方法

2013年度は仮想インピーダンスを用いた6脚歩行ロボットの全歩行歩行制御についてFig.2に示す6脚ロボットの3DCADモデルをベースに制御系設計ツール MATLAB/Simulinkを用いて検討を行った。Fig.3に3脚支持状態において、仮想インピーダンスを設定した場合に旋回部で発生するトルクとこの反力により胴体が受ける力との関係を示す。ロボット胴体の重心位置におけるx方向、y方向およびヨー角 $\theta_z$ 周りの運動方程式は次式となる。

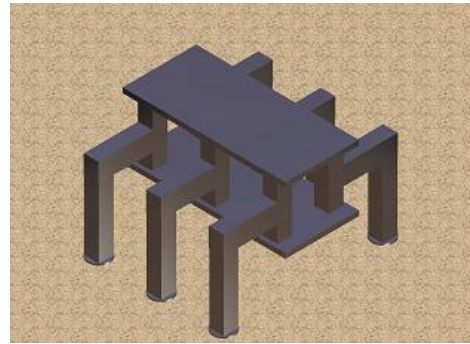


Fig.2 3D CAD model of six-legged robot

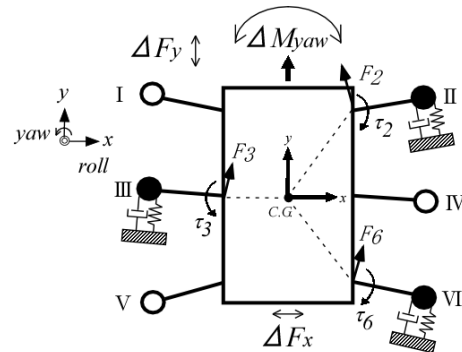


Fig.3 Imaginary impedance model for a six-legged robot

$$\begin{cases} M\ddot{x} = F_2 \sin(-\theta_2) + F_3 \sin \theta_3 + F_6 \sin(-\theta_6) \\ M\ddot{y} = F_2 \cos(-\theta_2) + F_3 \cos \theta_3 + F_6 \cos(-\theta_6) \\ I_z \ddot{\theta}_z = F_2 r_2 \cos \psi_2 - F_3 r_3 \cos \psi_3 + F_6 r_6 \cos \psi_6 \end{cases} \quad (1)$$

支持脚旋回部リンクの仮想インピーダンスをバネとダンパを用いて設定し、式(1)を12次の状態変数からなる状態ベクトルを用いて状態方程式に書き改める。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1(2)} \\ \dot{x}_{4(3)} \\ \dot{x}_{5(6)} \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1(2)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & A_{4(3)} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{5(6)} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 3} & A_{75} \\ A_{81(82)} & A_{84(83)} & A_{85(86)} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1(2)} \\ x_{4(3)} \\ x_{5(6)} \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1(2)} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & B_{4(3)} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & B_{5(6)} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} u_{fb} \quad (2)$$

式(2)のモデルに対してLQI制御系を設計し、直線軌道と円軌道に対する追従性能の検証を行った。

2014年度は実機において、仮想インピーダンスを設定しないモデルで実機における歩行方向制御の性能実験について検討した。その結果、支持脚旋回部においては歩行時に目

標軌道に追従する PD 制御を行っている状態を定常状態として、歩行方向制御の FB 入力を PD 制御の入力に足し合わせる方法が有効であることが判明した。そこで、2014 年度以降は、歩行方向制御に関しては仮想インピーダンスを設定しない、胴体の状態変数のみの 6 次とするモデルで歩行方向制御を行うこととした。

2015 年度は姿勢制御と歩行方向制御の協調制御手法について検討を行った。姿勢制御は Fig.4 に示す仮想インピーダンスを設定したモデルで行った。歩行方向制御は、式(1)のモデルでは、旋回部のみの入力しか用いていなかったため、進行方向 y に対しては変位を取ることができ、目標軌道に追従するが、x 方向に対しては変位を取ることができず、追従性が良くない。そこで、Fig.5 に示す脚リンク機構において支持脚腿部および脛部リンクの駆動トルクによる支持脚足の平部で発生する  $F_{ixy}$  に対する胴体反力  $F'_{ixy}$  を入力として付加するモデルを構築した。

6 脚歩行ロボットが LegII, III, VI の 3 脚支持の状態を考える。支持脚の旋回部駆動トルクによる胴体に作用する反力を  $F_{i1}$  ( $i=2,3,6$ )、支持脚腿部および脛部の駆動トルクによる

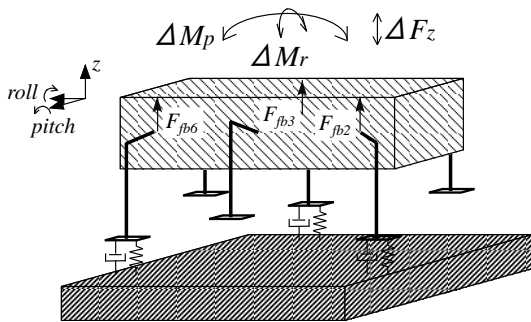


Fig.4 Imaginary impedance model of FB control for a six-legged robot

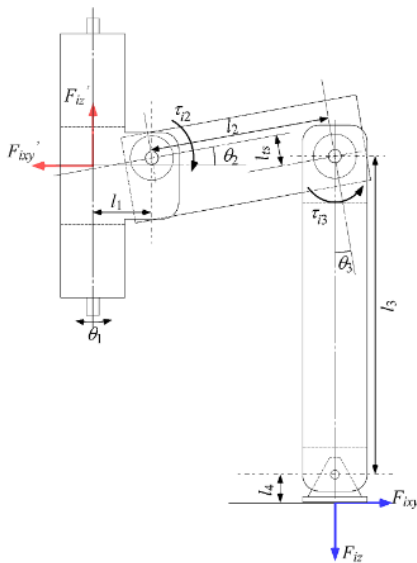


Fig.5 The relation between reaction forces at the body and forces acting at the sole

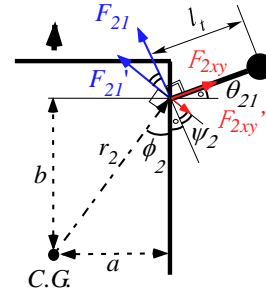


Fig. 6 The relationship between  $\phi$ ,  $\theta$ , and  $\psi$

胴体旋回部に作用する反力を  $F_{ixy}$  ( $i=2,3,6$ )、ロボット胴体の質量を  $M$ 、ロボット胴体の重心におけるヨー軸周りの慣性モーメントを  $I_z$ 、胴体のヨー角を  $\theta_z$ 、支持脚旋回部と胴体重心との距離を  $r_i$  ( $i=2,3,6$ )とする。ロボット胴体の重心位置における x 方向、y 方向およびヨー角  $\theta_z$  周りの運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} M\ddot{x} = F_{21} \sin(-\theta_{21}) + F_{31} \sin \theta_{31} + F_{61} \sin(-\theta_{61}) \\ \quad + F_{2xy} \cos \theta_{21} + F_{3xy} \cos(-\theta_{31}) + F_{6xy} \cos \theta_{61} \\ M\ddot{y} = F_{21} \cos(-\theta_{21}) + F_{31} \cos \theta_{31} + F_{61} \cos(-\theta_{61}) \\ \quad + F_{2xy} \sin \theta_{21} + F_{3xy} \sin(-\theta_{31}) + F_{6xy} \sin \theta_{61} \\ I_z \ddot{\theta}_z = F_{21} r_2 \cos \psi_2 - F_{31} r_3 \cos \psi_3 + F_{61} r_6 \cos \psi_6 \\ \quad - F_{2xy} r_2 \sin \psi_2 + F_{3xy} r_3 \sin \psi_3 + F_{6xy} r_6 \sin \psi_6 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)を 6 次の状態変数を定義することにより次の状態方程式が得られる。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(t)u(t) \quad (4)$$

式(4)で表わされるシステムに対して LQI 制御系を設計し、歩行方向制御系とした。また姿勢制御は報告者が文献[1]で提案する手法を腿部リンクの FB 制御系として適用した。この場合、歩行方向制御の入力  $F_{ixy}$  をヤコビ行列を用いて腿部リンクと脛部リンクの駆動トルクに変換する。その結果、腿部リンクの駆動トルクにおいて、姿勢制御の入力と歩行方向制御の入力が干渉する問題が生じる。[1] 内田洋彰, 亀山卓也, 6 脚ロボットの外乱による腿角度偏差に対する仮想インピーダンス姿勢制御の外乱抑圧性, 日本機械学会論文集, 第 78 巻, 第 795 号, C 編 pp.3689-3704, 2012

#### 4. 研究成果

2013 年度に仮想インピーダンスを設定したモデルを用いて 3DCAD モデルでシミュレーションした結果の一例を Fig.7 に示す。シミュレーションは半径 0.5m の半円を歩行周期 9s で 18 周期で歩行する軌道为目标軌道とした。Fig.7 は x-y 平面における歩行軌道を示す。図中で、赤の実線は提案手法、青の破線は、インピーダンスを設定しない場合の結果を示す。インピーダンスを設定することにより目標軌道への追従性の向上がみられる。

2014年度は歩行方向制御において、歩行時には旋回部リンクの目標軌道が常に変化するので、旋回部リンクは目標軌道に追従するPD制御を行っている状態を定常状態と考え、歩行方向制御によるFB入力をPD制御の入力に付加する方法とした。この場合、仮想インピーダンスを設定しないモデルにおいても追従性が悪化しないことが判明したため、仮想インピーダンスを設定しない6次のモデルで歩行方向制御を行うこととした。この場合の3DCADモデルでシミュレーションした結果の一例をFig.8に示す。目標軌道は半径0.5mの半円を歩行周期9s, 18周期で歩行する軌道とした。図中で、赤の実線は支持脚旋回部リンクをPD+FB制御、青の破線はPD制御のみの場合の結果を示す。黒の点線は目標軌道を示す。PD制御のみの場合には支持脚の滑りにより目標軌道から大きくずれているが、歩行方向制御を付加した場合には、目標軌道に追従する結果となり、制御性能が改善されている。また、実機を用いた歩行実験での歩行方向制御についても検証を行った。Fig.9に歩行実験結果を示す。Fig.9(a)はは進行方向y軸の時間応答波形、Fig.9(b)はヨー角の時間応答波形を示す。図中において、赤の実線がPD制御+FB制御、青の破線がPD制御のみ、黒の点線が目標値を示す。進行方向yについては、PD+FB制御、PD制御ともにほぼ目標値に沿って歩行している。ヨー角は歩行方向制御のFB入力が有効に働いて、ヨー角についても目標軌道

に追従するように制御していることがわかる。Fig.9(c)はPD+FB制御時の終了時のロボットの位置および姿勢を示す。歩行実験においてもロボットの軌道追従制御手法として有効であることが確認された。

2014年までに第1の目的である歩行方向制御の制御性能について3DCADモデルと歩行実験により検証を行った。2015年度は第3の目的である姿勢制御と歩行方向制御の協調制御手法の検討を中心に行った。3Dシミュレーションでは、段差50mmの不整地での歩行実験結果をFig.10, 11に示す。Fig.10はアニメーション結果で112.5sでのロボットの状態を示す。Fig.11は(a)~(c)にx, y, ヨー角, (d)~(f)に胴体高さ, ピッチ角, ロール角の結果を示す。図中において赤の実線が6自由度制御の場合、青の破線が姿勢制御の3自由度制御の場合である。x, yおよびヨー角の歩行方向制御が働いて6自由度制御では目標軌道に追従している。胴体高さ, ピッチ角およびロール角は6自由度制御の場合、姿

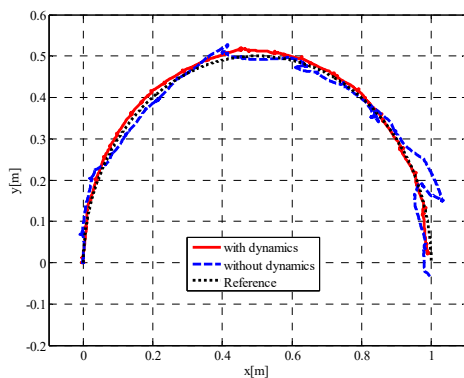


Fig.7 Simulation results of 3D Simulation in the case of setting imaginary impedance.

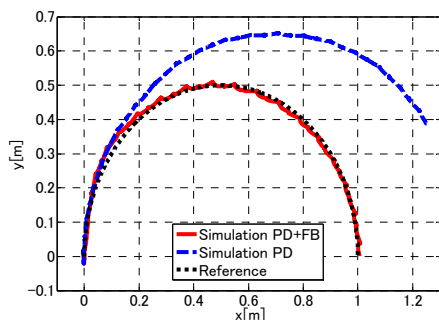
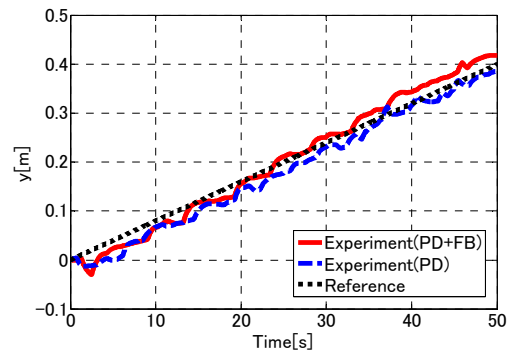
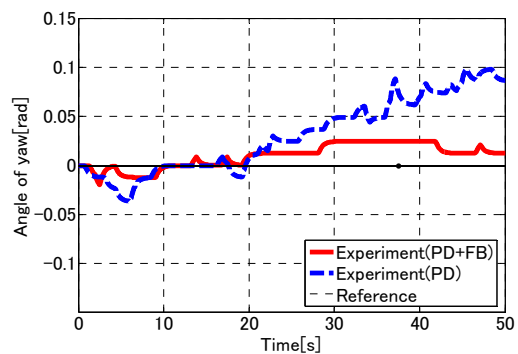


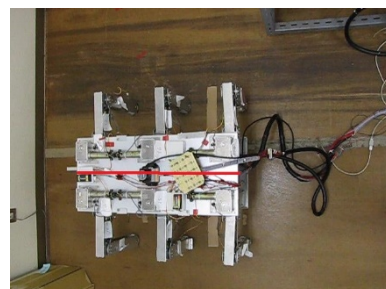
Fig.8 Simulation results of  $x$ - $y$  position (semicircular trajectory)



(a) Time response of  $y$

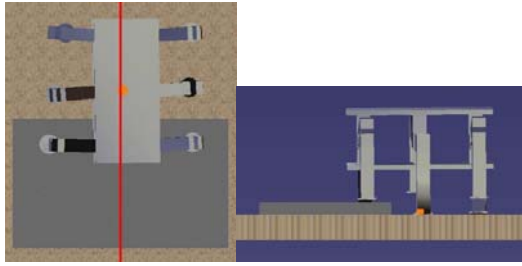


(b) Time response of yaw



(c) Example of experimental results  
Fig.9 Results of straight walking





(a) Top view at 112.5 s (b) Side view at 112.5 s  
Fig.10 Animations in the case of a step obstacle

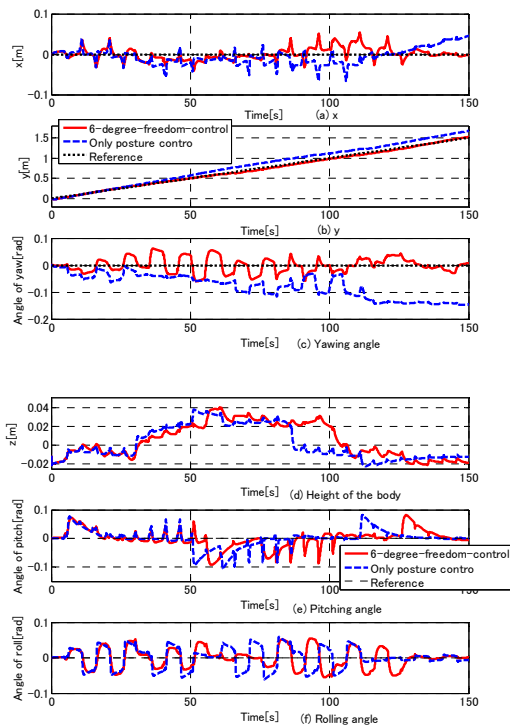


Fig.11 Simulation results of 6-degree-of-freedom control in the case of existing bump

勢制御のみの場合と同程度の制御性能が得られている。

第 2 の研究目的である応答性の改善については、研究の目的を胴体 6 自由度制御手法に重点を置いたため、今後の検討課題とする。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①Hiroaki Uchida, Trajectory Tracking Control for Six-legged Robot by Correction of Leg Link Target Trajectories Based on LQI Control, Int. Jour. of Control Science and Engineering, Vol.6, No.1, pp.1-11, 2016, 査読有, DOI: 10.5923/j.control.20160601.01

[学会発表] (計 7 件)

- ①細井将士, 内田洋彰, 自己位置推定手法に基づく 6 脚ロボットの歩行方向制御, 日本機械学会関東学生会第 55 回学生会卒業研究発表講演会,

2016 年 3 月 10 日, 東京工業大学(東京都).

- ②内田洋彰, 伊藤寛和, 6 脚ロボットの歩行方向制御の実験的検討, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月 14 日, 神戸大学(神戸市).

- ③Hiroaki Uchida, Hirokazu Itho, Naoki Numata, Experimental Examination of Walking Directional Control for a Six-legged Robot, Proc. of 18th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines, pp381-388, 2015 年 9 月 7 日, Hangzhou (China)

- ④Masashi Hosoi, Masashi Suzuki, Hiroaki Uchida, 6-degree of Freedom Control of the Body for a Six-Legged Robot, Int. Workshop on Effective Engineering Education(IWEEE), 2015 年 8 月 20 日, 木更津高専(木更津市)

- ⑤Hiroaki Uchida, Kouhei Takahashi, Virtual Impedance Based Path Following Walking Control for a Six-legged Robot, Proc. of 17th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines, pp385-392, 2014 年 7 月 21 日, Poznań (Poland)

- ⑥内田洋彰, 高橋康平, 6 脚ロボットの仮想インピーダンス軌道追従制御, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 17 日, 新潟大学(新潟市).

- ⑦Hiroaki Uchida, Kouhei Takahashi, Masaya Suzuki, Method for Estimating Location and Yaw Angle of a Six-legged Robot for Omni-directional Walking Control, Proc. of 16th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines, 2013 年 7 月 17 日, Sydney (Australia)

[図書] (計 1 件)

- ①Hiroaki Uchida, Noriyuki Shiina, Springer, Autonomous Control Systems and Vehicles, Walking Directional Control of Six-Legged Robot by Time-Varying Feedback System, 2013, pp.251-263

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

○取得状況 (計 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 洋彰 (UCHIDA Hiroaki)

木更津工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号 : 00223561

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者