

地形センシング用床反力センサ及び6脚ロボットの開発

Development of Ground Reaction Force Sensor for Terrain Sensing and Hexapod Robot

曹 梅芬¹

山下 滉明¹

清住 空樹²

多田 有佑³

Meifen CAO

Koumei Yamashita

Takaki Kiyozumi

Yusuke Tada

Abstract – In this research, a hexapod robot and a 3-axis ground reaction force sensor have been designed and developed. The developed hexapod robot consists of six leg units and each unit is with 3 degrees of freedom. The developed ground reaction force sensor has a hemisphere sensing range and the contact between foot and ground can be detected as a thrust load as well as the contact between foot and wall can be detected as a radial load. Since the developed sensor can be applied regardless of the movement direction, the sensor can be used to achieve omnidirectional movement of a hexapod robot on rough terrain at a low cost. In this paper, a posture control method of walking on rough terrain is proposed for the hexapod robot with a gyro-sensor and the originally developed ground reaction force sensor. The usefulness of the developed force sensor and the effectiveness of the proposed posture control method have been verified by walking experiments on a gravel road course and a slope road course.

Key Words: hexapod robot, ground reaction force sensor, rough terrain, tri-pod gait, terrain sensing, posture control

1. はじめに

危険な災害現場など人が立ち入ることが困難な場所での救出活動や情報収集を担うロボットの普及に高い期待が集まっている。そのような環境下でロボットが行動するには、様々な地形を踏破できる高い移動能力が求められ[1]、消費エネルギーや活動範囲などから、ロボットの小型軽量化も重要となる。車輪型ロボットは平坦地での移動効率は高いが[2]、階段などの不整地での移動は困難である。クローラロボットは階段や砂利道などの不整地での移動が得意であるが、凹凸が激しい地形との接触面積を確保するのが難しい。一方、脚ロボットは対地適応性が高く、不整地移動用にその開発が期待されている。6脚(Hexapod)ロボットは不整地移動時に4脚より安定性が高いが、ロボットの駆動モータの数が多く、歩容制御が難しくなる。

このような目的のロボットに対して、いくつかの先行研究が報告されている。例えば、3軸足先力センサを開発し、開発したセンサを用いた6脚ロボットの坂道爬行の実験結果が報告されている[3]。しかし、砂利道や階段などの不整地での移動や姿勢制御の実験結果は報告されていない。また、異なる起伏の地形を移動する6脚ロボットのトライポッド歩容についても報告されているが[4]、足と地面の接触を検出するために一方向のタッチセンサを使用しているため、他方向からの力を検出することができず、階段や砂利道などのバリアや崩れやすい地形を検出することが困難である。

本研究では、3自由度1脚ユニット計6つ、全18自由度で構成される6脚ロボット及び3軸床反力センサの設

計・開発を行った。本研究で開発した床反力センサを構成する部品は安価で容易に入手可能であり、プリント基板などのハードウェアもすべて自作したため、安価に開発・製作することができる。また開発したセンサを用いた不整地歩行システムは、移動方向に関係なく適用することができるため、床反力センシングは全方位移動の不整地歩行モビリティをより低コストで実現できる。本論文では、本研究で開発した3軸床反力センサ及び6脚ロボットを紹介し、ロボットに搭載したジャイロセンサと開発した床反力センサを用いた地形センシングによる不整地歩行の姿勢制御手法を提案する。また提案法の有効性の実験検証結果を報告する。

2. 本研究で開発した3軸床反力センサ及び6脚ロボットの概要

2.1. 3軸床反力センサ及び計測システムの開発

本研究で開発した3軸床反力センサは、Fig.1に示すロードセル2つと圧電式圧力センサ1つで構成されている。開発したセンサは、歩行中に足が障害物に接触したときの接触方向と接触の強さを検出することができる。Fig.2にラジアル荷重検出機構(2つのロードセル)及びスラスト荷重検出機構(1つの圧電式圧力センサ)の配置を示す。Fig.2に示すような半球状のセンシング範囲を持ち、外部からの垂直方向の圧力とそれ以外の全方向の力を検出することができる。また、Fig.3に示すように、足と地面と

¹ 東京都立産業技術高等専門学校 電気電子工学コース

² 横浜国立大学 理工学部 数物・電子情報系学科

³ 千葉工業大学 未来ロボティクス学科



Fig. 1 Load cell (left: SC616C) and force sensor (right: ALPS HSF303A)



Fig. 2 Placement of sensors and hemisphere sensing range

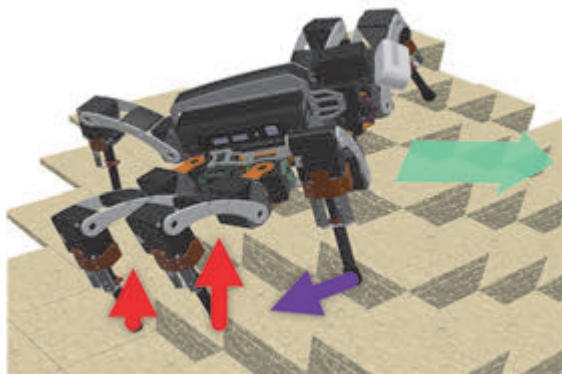
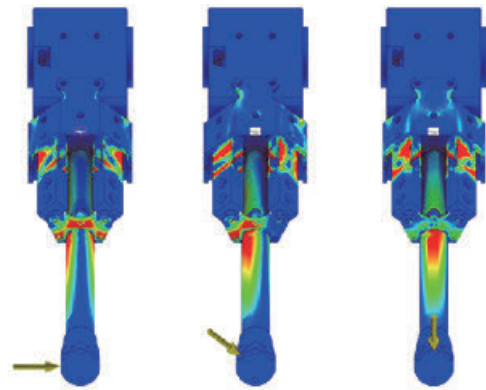


Fig. 3 Terrain sensing using the developed ground reaction force sensor

の接触をスラスト荷重, 足と壁との接触をラジアル荷重として検出することができる。開発したセンサのCAEによる構造解析結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 では赤色に近づくほど応力が強いことを示している。従って、ロードセルのひずみゲージ部に応力が集中していることが確認できる。このセンサに用いた部品は安価で容易に入手可能であり、Fig. 5 に示すプリント基板などのハードウェアをすべて自作したため、システム全体を安価に開発・製作することができる。

本研究で開発した3軸床反力センサは大量の計算機リソースを必要とするシステム(例えば、Deep Neural Network)を使わない限りは、ビジョンセンサと比較してごく僅かな計算機リソースでも計算を行える。また、センシングの全指向性を有している。コストが高く比較対象から除外した三次元LiDAR等のハイエンドなビジョンセン



(a)Force from left (b)Force from left-front (c)Force from front

Fig. 4 Structural analysis using CAE

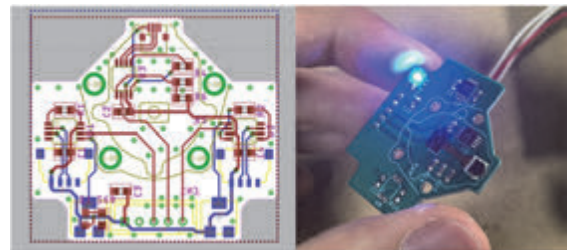


Fig. 5 Schematic design and appearance of measurement module board

サを除けば、一般的なデュアルカメラを必要とするToF (Time-of-Flight Camera)やRGB-Dビジョンセンサはそのセンシング方向が単一方向に限定される。従って、本研究で開発したこの安価な3軸床反力センサは、地形センシングセンサとして、移動方向に関係なく応用できるため、不整地での6脚ロボットの全方位移動を低コストで実現することができる。

2.2. 6脚ロボットの開発

本研究で開発した6脚ロボット(以下、HaptHexaと呼ぶ)の外観図を Fig. 6 に示す。ロボットは6本の脚ユニットを持ち、それぞれの脚ユニットは3自由度(Fig. 7参照)である。各脚ユニットは3つの部位から構成されており、胴体部(thorax)から股関節部(coxa)、大腿骨部(femur)、脛骨部(tibia)の3節で構成されている。3自由度を持つ3関節脚の先端は、脚の可動範囲内であれば3次元空間の任意の場所に到達させることができる。

HaptHexaは、Fig. 8 に示すように、同一仕様の6つの脚ユニットを60°間隔で配置した構成になっている。そのため、6つの脚ユニットすべて同じ制御システムを適用することができる。HaptHexaの主な仕様を Table I に示す。

3. 姿勢制御

本研究では、ロボットに搭載しているジャイロセンサを用いてロボットボディの水平面からのオイラー角 $[\alpha \beta]^T$

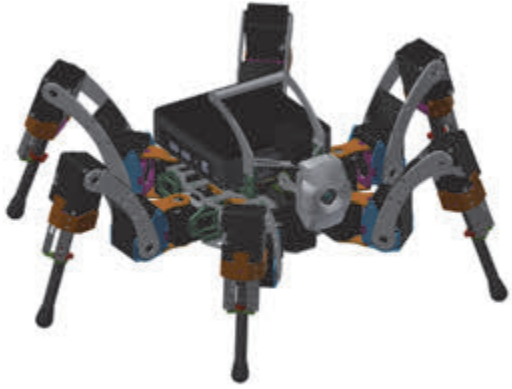


Fig. 6 External view of HaptHexa

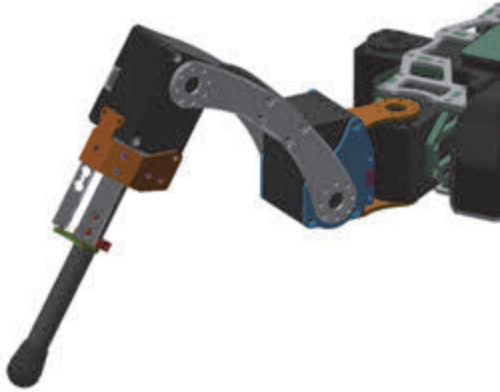


Fig. 7 3-DOF leg unit

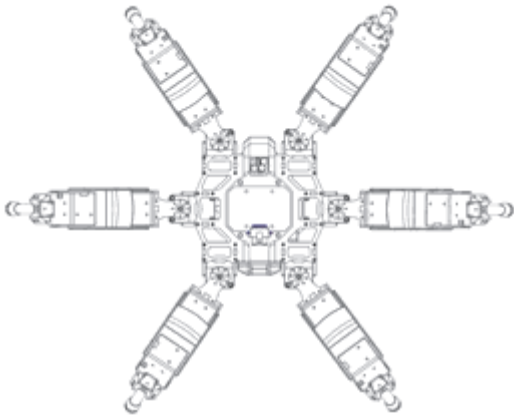


Fig. 8 Leg layout of HaptHexa

(Fig. 9 参照)を取得し, $[\alpha \beta]^T$ をPID 制御により0になるように制御し, ロボットのボディを水平に保つ姿勢制御方式を提案する. 姿勢制御ブロック線図をFig. 10に示す.

まず, ジャイロセンサによりボディの水平面からのオイラー角 $[\alpha \beta]^T$ を取得し, 目標値 $[\alpha^* \beta^*]^T = [0 \ 0]^T$ との偏差を求める. ここで, α はロール角(x軸周り), β はピッチ角(y軸周り)である. そして, ロボットの支持多角形とボ

TABLE I. SPECIFICATIONS OF HAPTHEXA

Mass[kg]	2.565 (3.35 with battery and Intel NUC)
Width [mm]	
Body	160
Length [mm]	
Body	140
Coxa	40
Femur	100
Tibia	125
DOF	18 (3-DOF of each leg × 6 legs)
Actuators	XM430-W350-T (ROBOTIS [5])
Sensors	3-axis Ground reaction force sensor (originally developed)
	JY901: 9-axis accelerometer gyro module (Wit-motion [6])
Battery	Li-Po 11.1V 2500mAh

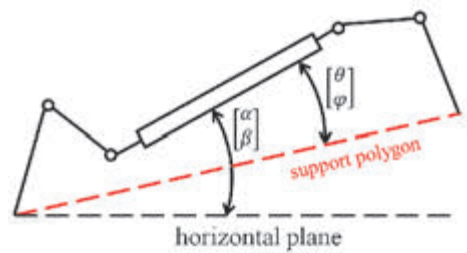


Fig. 9 Side or rear-view of the posture of HaptHexa

ディ間のオイラー角 $[\theta \ \varphi]^T$ (以下, 姿勢角と呼ぶ, Fig. 9 参照)をPID コントローラにより決定する. 次に, Fig. 9 のBlock Aを用いて操作量 $[\theta \ \varphi]^T$ を各脚のつま先のXYZ座標に変換する. なお, 各支持脚のつま先のXYZ座標は式(1)~(3)により計算できる. ただし, $i = 0, 1, \dots, 5$, a は支持多角形の一辺の長さ, H は支持多角形の中心からボディの中心までの長さ (Fig. 11 参照), $[\Psi_0 \ \Psi_1 \ \Psi_2 \ \Psi_3 \ \Psi_4 \ \Psi_5]^T = [\pi/6 \ \pi/2 \ 5\pi/6 \ -5\pi/6 \ -\pi/2 \ -\pi/6]^T$ である. 各遊脚のつま先の XYZ 座標は支持脚時の座標と歩行軌道 (4章を参照)で変化した分の加算により計算できる. 最後に,

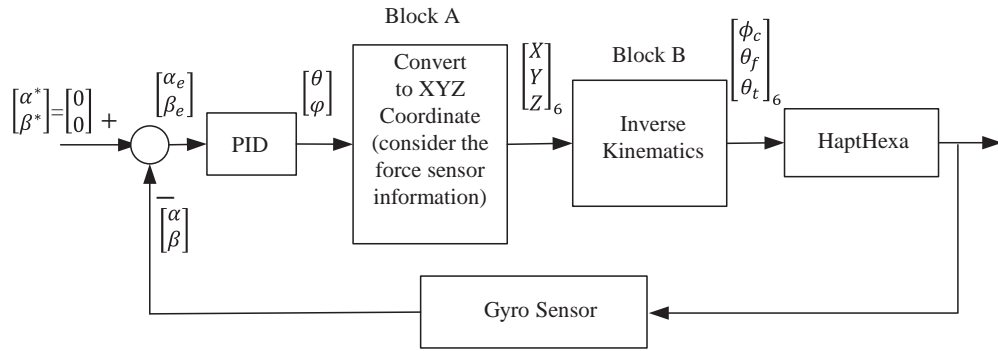


Fig. 10 Block diagram of the posture control system

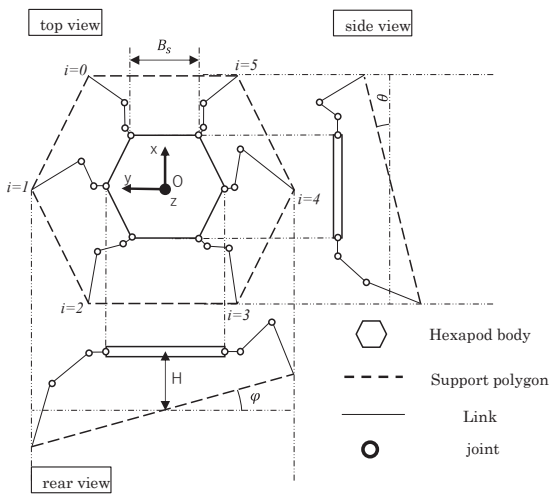


Fig. 11 Static posture model of HaptHexa

Block B を用いて XYZ 座標を各モータの回転角指令値 $[\phi_c \ \theta_f \ \theta_t]_6^T$ (Fig. 12 参照, 下付き数字 6 は 6 本脚を指す) に変換し, ロボットに出力する. Block B の詳細は参考文献[7]を参照して頂き, ここでは省略する.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} [i] = R_y(\theta)R_x(\varphi) \begin{bmatrix} a \cdot \cos(\psi_i) \\ a \cdot \sin(\psi_i) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -H \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. 実験検証

4.1. 歩行軌道と歩容

実験用遊脚の歩行軌道を Fig. 13 に示す. W は歩幅, h は足の持ち上がり高さである. 床反力センサが障害物を検出するまで足は軌跡に沿って移動する. 床反力センサが時間遅れなく地面との接触を検出でき, かつ, 脚部の移動範囲

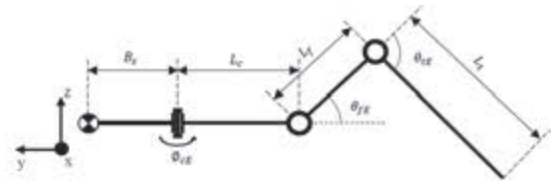


Fig. 12 Link model of one leg

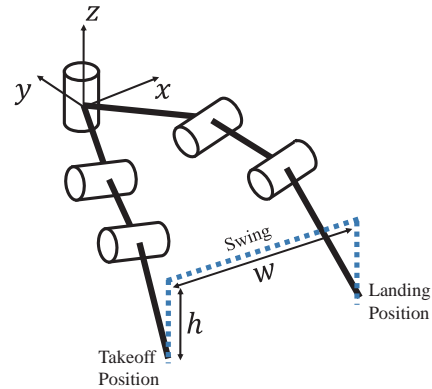


Fig. 13 Walking trajectory

がロボットハードウェアの限界を超えない範囲であれば, ロボットのボディを水平に保ちながら, 不整地やスロープなどを踏破することが可能である.

トライポッド歩容[4]は, 2対1本おきの3脚が交互に前進する6脚ロボットの歩容の一つである. 3本の足は常に地面に接触しているため, 安定した高速歩行が可能である. 本研究ではこのトライポッド歩容を用いる.

4.2. 砂利道コースでの歩行実験

実験用砂利道コースを製作した. 地面からの高低差を 10cm とし, 直径 2cm から 15cm 程度の石を敷き詰めた. 砂利道コースの全長は 100cm である. 前項で述べた歩行軌跡と歩容を用いて, 歩幅 $W=8\text{cm}$, 足上げ高さ $h=12\text{cm}$ の歩行実験を行った. 姿勢制御なしの場合の実験様子を Fig.

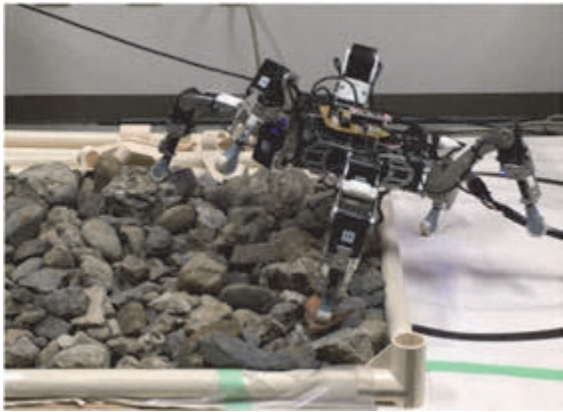


Fig. 14 Walking experiment on gravel road course without posture control

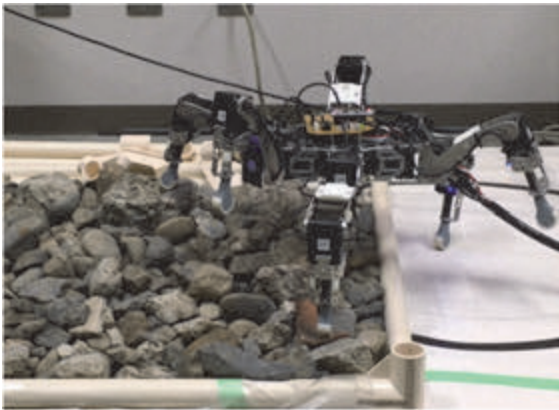


Fig. 15 Walking experiment on gravel road course with posture control using gyro-sensor and developed ground reaction force sensor

14 に、ジャイロセンサと開発した床反力センサを用いて姿勢制御を行った場合の実験様子を Fig. 15 に示す。また、歩行中にジャイロセンサから取得したボディのロール角（ x 軸周り）とピッチ角（ y 軸周り）の時間変化をそれぞれ Fig. 16 と Fig. 17 に示す。

4.3. 坂道コースでの歩行実験

実験用坂道コースを製作した。坂道コースの全長は約 100cm、傾斜は 14.2° である。前項で述べた歩行軌跡と歩容を用いて、歩幅 $W=8\text{cm}$ 、足上げ高さ $h=12\text{cm}$ の歩行実験を行った。姿勢制御なしの場合の実験様子を Fig. 18 に、ジャイロセンサと開発した床反力センサを用いて姿勢制御を行った場合の実験様子を Fig. 19 に示す。また、歩行中にジャイロセンサから取得したボディのロール角（ x 軸周り）とピッチ角（ y 軸周り）の時間変化をそれぞれ Fig. 20 と Fig. 21 に示す。

4.4. 実験結果

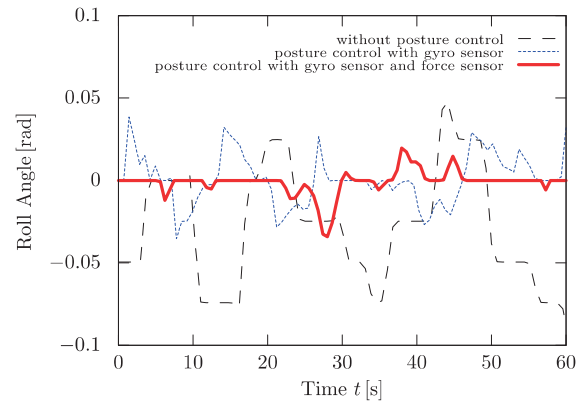


Fig. 16 Roll angle variations during walking experiment on gravel road course

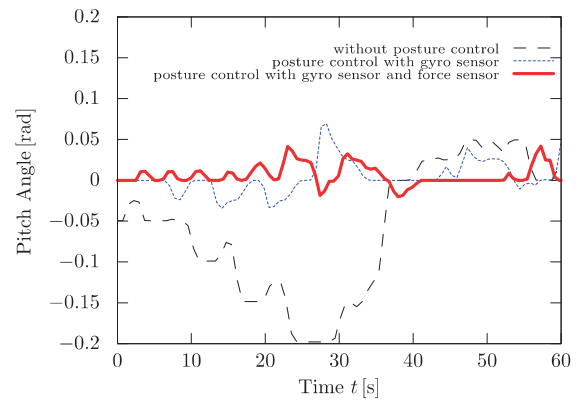


Fig. 17 Pitch angle variations during walking experiment on gravel road course

砂利道コースと坂道コースでの下記の3つの場合の実験結果を比較した。一つ目は姿勢制御なしの場合、二つ目はジャイロセンサのみを用いて姿勢制御を行った場合、三つ目はジャイロセンサと本研究で開発した床反力センサを用いて姿勢制御を行った場合である。

砂利道コースと坂道コースを歩行する際に、姿勢制御なしの場合とジャイロセンサのみを用いた姿勢制御の場合に比べて、ジャイロセンサと床反力センサを用いて姿勢制御を行った場合、ロボットのボディを最も水平に保つことができた。

5. おわりに

本研究では、独自に開発した3軸床反力センサを搭載した6脚ロボット HaptHexa を設計・開発した。開発した床反力センサは半球のセンシング範囲を持ち、足と地面の接触をスラスト荷重として、足と壁の接触をラジアル荷重として検出することができる。また、開発した床反力センサは移動方向に関係なく応用できるため、不整地での6脚ロボットの全方位移動を低コストで実現することができる。本論文では、ジャイロセンサと開発した床反力センサを用



Fig. 18 Walking experiment on slope road course without posture control

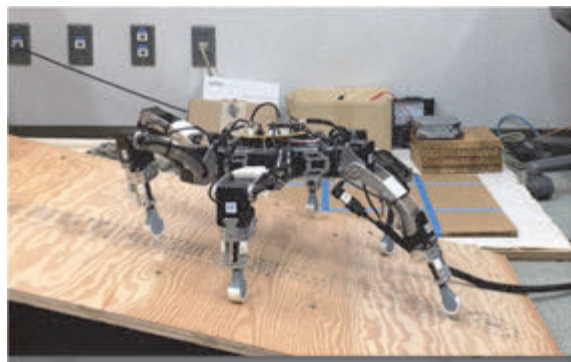


Fig. 19 Walking experiment on slope road course with posture control using gyro-sensor and developed ground reaction force sensor

いた6脚ロボットの不整地歩行と姿勢制御法を提案し、砂利道コースと坂道コースでの実験検証を行った。開発した床反力センサの有用性と提案した姿勢制御法の有効性を実験により検証した。今後は開発した床反力センサのキャリブレーションを行い、リアルタイム地形センシング手法を考案し、階段状や崩れやすい不安定な地形で踏破実験を行う予定である。

参考文献

- [1] 田所諭, “レスキューロボットの技術チャレンジ”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.134-137, 2010
- [2] L. Bruzzone1, G. Quaglia, “Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments”, MECHANICAL SCIENCES. - ISSN 2191-9151. - ELETTRONICO. - 3:2(2012), pp. 49-62
- [3] He Zhang, Rui Wu and etc., “A Force-Sensing System on Legs for Biomimetic Hexapod Robots Interacting with

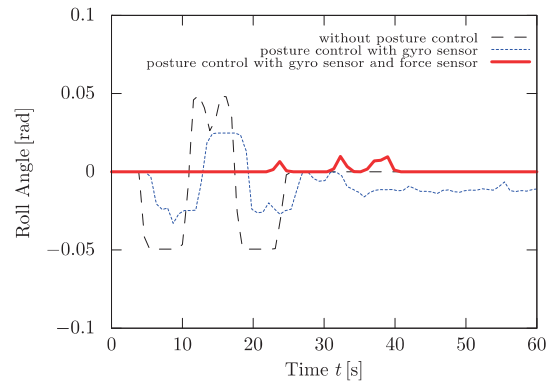


Fig. 20 Roll angle variations during walking experiment on slope road course

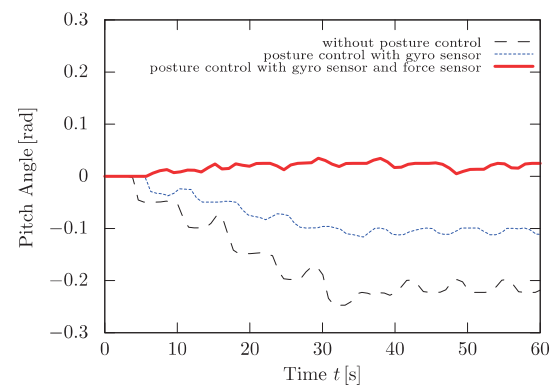


Fig. 21 Pitch angle variations during walking experiment on slope road course

Unstructured Terrain”, Sensors 2017, 17(7), 1514; <https://doi.org/10.3390/s17071514>

- [4] 佐藤悠, 井上健司, “異なる起伏の地形を移動する6脚ロボットのトライポット歩容”, 日本機械学会論文誌, Vol. 82., No. 843, pp. 1-13, 2016
- [5] ROBOTIS e-Manual, <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm430-w350/>
- [6] Wit-motion, http://www.wit-motion.com/english.php?m=goods&a=details&content_id=87
- [7] 清住空樹, 多田有佑, 曹梅芬, “不整地における6脚ロボットのジャイロセンサを用いた姿勢制御”, Proceedings of the 2020 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kanazawa, Japan, May 27-29, 2A2-L51(pp. 1-4), 2020