

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06243

研究課題名(和文)6脚ロボットの冗長入力最適化手法と一部アクチュエータ故障に対する耐故障制御

研究課題名(英文) Optimization method of redundant control inputs and fault tolerant control against partial actuator failure for six-legged-robot

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：6脚ロボットの冗長となる入力の最適化手法について、胴体6自由度を制御する、姿勢制御手法と歩行方向制御について検討を行った。歩行は5脚支持歩行とし、姿勢制御(胴体高さ、ピッチ角、ロール角)、歩行方向制御(胴体重心位置x-y、ヨー角)を行う場合、2脚は冗長となる。LQI制御系を構築し、得られたフィードバック(FB)入力を最適化手法を用いて最適化を行う方法について検討した。脚リンクの一部アクチュエータが損傷した場合の胴体6自由度制御手法の有効性について姿勢制御、歩行方向制御についてそれぞれ検討した。検討した手法の有効性は3Dシミュレーションにより確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

6脚ロボットの胴体6自由度制御手法における脚リンクアクチュエータの冗長入力の最適化手法とその制御性能、脚リンクアクチュエータが故障した場合の歩容と胴体6自由度制御手法のロバスト性能について明らかにした。5脚支持歩行の場合、3脚支持が維持できる状態であれば、2脚のアクチュエータが損傷しても5脚支持と同等の制御性能が得られることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, the optimization method of redundant inputs for a six-legged robot is examined. The optimization method is applied for a six-degree-of-freedom (6-DOF) control of the robot body. The 6-DOF control is composed by a posture control method and the walking directional control. The gait is 5-support-legged-walking and the posture control and the walking directional control are performed. In the case of 5-support-legged-walking, the two legs are redundant. LQI control systems are constructed, and a method to optimize the obtained feedback (FB) inputs using an optimization method examined. The effectiveness of the 6-DOF control method of the body when some actuators of the leg links were damaged was examined for a posture control and a walking directional control, respectively. The effectiveness of the examined methods is confirmed by 3D simulations.

研究分野：計測制御

キーワード：6脚ロボット 胴体6自由度制御 姿勢制御 歩行方向制御 冗長入力 アクチュエータ故障 LQI制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの多脚ロボットに関する研究の多くは、歩行アルゴリズムの開発、軌道計画、歩行制御手法、歩行環境を認識した自己位置認識およびマッピング(SLAM)である。アクチュエータが損傷等した場合に歩行を実現し、修理可能な場所まで戻ってくる耐故障性の報告はいくつかみられるが、脚1脚が損傷した場合等、歩容生成に重点を置いており、支持脚の冗長入力を代替に制御理論の観点から耐故障性について検討した報告は見当たらない。

報告者は研究開始前までに、6脚ロボットの不整地での安定した胴体姿勢を実現する姿勢制御手法(ピッチ角、ロール角、胴体高さ)および胴体重心の位置( $x, y$ )と進行方向角度、ヨー角を目標軌道に追従する歩行方向制御手法の研究を中心に研究を行ってきた。具体的には、多脚ロボットの脚機構として Fig.2 に示す 6脚ロボットの脚機構において、姿勢制御と歩行方向制御を各々独立して制御する制御手法について検討した。研究手法としては 6脚ロボットの制御手法について 3Dモデル(Fig.1)と制御系設計ツール MATLAB/Simulink により数値計算を行って評価し、その後、制御系を実装して実機において有用性を評価している。以前の研究において、仮想インピーダンスを設定した胴体姿勢制御手法を提案し、胴体姿勢の目標軌道に対する追従性能の検証、不整地歩行での外乱抑圧性の検証を行った。さらには、方向歩行制御の目標値追従性能について 3Dシミュレーションと歩行実験により検証した。これらの研究により 6脚ロボットが不整地で安定した姿勢を保つことができる姿勢制御、胴体重心位置およびヨー角が目標軌道に追従する歩行方向制御について各々の制御手法を確立した。さらに、姿勢制御と歩行方向制御を組み合わせた胴体 6自由度制御についても検討し、歩行方向制御と、姿勢制御の組み合わせた胴体 6自由度制御の有効性についても明らかにした。しかし、6脚ロボットの 3脚支持状態では 1脚につき 3自由度、計 9自由度のアクチュエータがあり、6自由度を制御する場合、3自由度は冗長となる。冗長自由度と前述のFB制御のロバスト性との関係は明確ではない。

### 2. 研究の目的

本研究では以下の3つの研究目的について検討した。

第1の目的は胴体6自由度制御手法におけるアクチュエータのダイナミクス変動に対するロバスト性の検証とした。これまでに、申請者が検証を行ってきた胴体6自由度制御手法で得られたアクチュエータのダイナミクス変動を歩行外乱と考え、外乱に対するロバスト性について検討する。

第2の目的としては、胴体6自由度制御における冗長入力の最適化手法の開発とした。胴体6自由度制御手法は歩行方向制御と姿勢制御の組み合わせである。本研究で用いる6脚ロボットの歩行方向制御は3脚、4脚、5脚支持歩行においてそれぞれ6入力、8入力、10入力、姿勢制御では同様に、3入力、4入力、5入力のシステムとなる。出力は両制御ともに3出力である。この場合、姿勢制御の3入力以外は、冗長なシステムである。そこで、第2の目的として冗長システムの最適化手法の検討を行い、歩行方向制御と姿勢制御における冗長な入力の役割について検討する。最適化手法を用いて、直線と円軌道の目標軌道、各歩容において、歩行方向制御、姿勢制御における支持脚の旋回部、腿部、脛部アクチュエータの役割について検討する。

第3の目的としては、胴体6自由度制御に基づく一部アクチュエータ故障に対する耐故障制御手法の開発とした。第3の目的では最適化手法をベースに、支持脚アクチュエータが何らかの原因で故障した場合に残りのアクチュエータで歩行方向制御、姿勢制御を実現する制御手法の開発を行う。これにより、歩行方向制御、姿勢制御の胴体6自由度制御の観点から支持脚の一部アクチュエータ故障に対して、歩行を実現する耐故障制御系設計について検討する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 6脚ロボットの3Dモデル

Fig.1に本研究で用いる6脚ロボットの3Dモデルを示す。Virtual Lab.Motionであるが、2019.5をもって契約更新ができなくなり、新たな3Dモデルは、機構解析ソフトAdamsに構築した。構築したモデルをFig.2に示す。

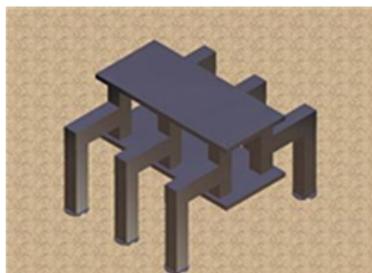


Fig. 1: 3D CAD model of a six-legged robot.

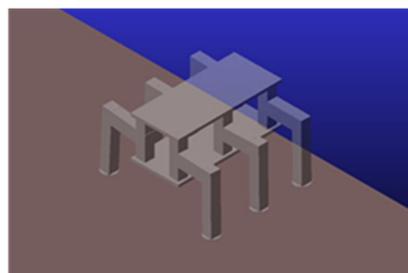


Fig. 2: New 3D CAD model.

### 3.2 歩行計画

本研究では、5脚支持歩行によりロボットが歩行する場合について検討する。Fig.3に6脚ロボットの脚番号を示す。Fig.4は5脚支持歩行による歩行パターンを示す。

### 3.3 姿勢制御と歩行方向制御手法

#### 3.3.1 姿勢制御モデル[1]

6脚ロボットが6脚支持の状態における運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} M\ddot{z} = F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} + F_{5z} + F_{6z} - Mg \\ I_p\ddot{\theta}_p = \gamma_1 F_1 + \gamma_2 F_2 + \gamma_3 F_3 + \gamma_4 F_4 + \gamma_5 F_5 + \gamma_6 F_6 \\ I_r\ddot{\theta}_r = x_1 F_1 + x_2 F_2 + x_3 F_3 + x_4 F_4 + x_5 F_5 + x_6 F_6 \end{cases} \quad (2)$$

#### 3.3.2 歩行方向制御モデル

運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} M\ddot{x}_{bg} = F_{11} \sin \theta_{11} + F_{21} \sin(-\theta_{21}) + F_{31} \sin \theta_{31} + F_{41} \sin(-\theta_{41}) + F_{51} \sin \theta_{51} + F_{61} \sin(-\theta_{61}) \\ \quad + F_{1xy} \cos(-\theta_{11}) + F_{2xy} \cos \theta_{21} + F_{3xy} \cos(-\theta_{31}) + F_{4xy} \cos \theta_{41} + F_{5xy} \cos(-\theta_{51}) + F_{6xy} \cos \theta_{61} \\ M\ddot{y}_{bg} = F_{11} \cos \theta_{11} + F_{21} \cos(-\theta_{21}) + F_{31} \cos \theta_{31} + F_{41} \cos(-\theta_{41}) + F_{51} \cos \theta_{51} + F_{61} \cos(-\theta_{61}) \\ \quad + F_{1xy} \sin(-\theta_{11}) + F_{2xy} \sin \theta_{21} + F_{3xy} \sin(-\theta_{31}) + F_{4xy} \sin \theta_{41} + F_{5xy} \sin(-\theta_{51}) + F_{6xy} \sin \theta_{61} \\ I_z\ddot{\theta}_z = -F_{11}r_1 \cos \psi_1 + F_{21}r_2 \cos \psi_2 - F_{31}r_3 \cos \psi_3 + F_{41}r_4 \cos \psi_4 - F_{51}r_5 \cos \psi_5 + F_{61}r_6 \cos \psi_6 \\ \quad + F_{1xy}r_1 \sin \psi_1 - F_{2xy}r_2 \sin \psi_2 + F_{3xy}r_3 \sin \psi_3 + F_{4xy}r_4 \sin \psi_4 + F_{5xy}r_5 \sin \psi_5 + F_{6xy}r_6 \sin \psi_6 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)と式(3)を状態方程式と出力方程式で表すと次式となる。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + dg + f(t) \quad (4-a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4-b)$$

### 3.4 LQI 制御系

3.3節で示した姿勢制御および歩行方向制御モデルを用いて、サーボ系を設計する。

$$\dot{x}_g(t) = A_g x_g + B_g u + d_g g + f_g + e_g r \quad (5)$$

支持脚のFB入力 $u_{fb}$ は、次式の評価関数を最小にするように求められる。

$$J = \int_0^{\infty} (x_g(t)^T Q x_g(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (6)$$

### 3.5 FB 制御入力の最適化

最適化を行う場合、姿勢制御における評価関数を次式のように定義する。

$$J_p = \frac{1}{2} \alpha_F (F_z - F_z^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_p (M_x - M_x^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_r (M_y - M_y^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_{\Delta z} \sum_{i=1}^N (f_{iz} - \frac{F_z}{N})^2 \quad (7)$$

歩行方向制御における評価関数を次式のように定義する。

$$J_d = \frac{1}{2} \alpha_x (F_x - F_x^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_y (F_y - F_y^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_{yaw} (M_z - M_z^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_{\Delta xy} \sum_{i=1}^N (\tau_i - \frac{T}{N})^2 \quad (8)$$

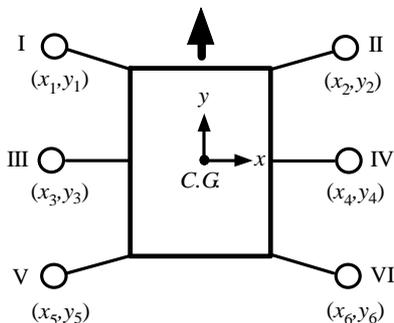


Fig.3: Leg number and position

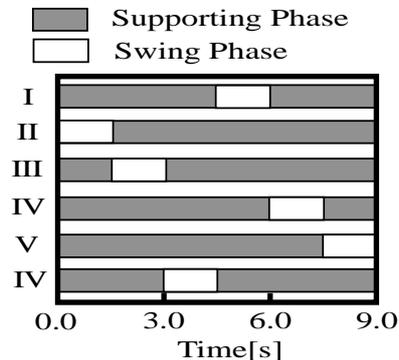


Fig.4: Walking pattern

## 4. 研究成果

### 4.1 姿勢制御における最適化

本節では、第2の課題、胴体6自由度制御における冗長入力最適化手法の開発で、姿勢制御の最適化手法について検討した結果を報告する。Nelder-Mead[2]手法は反復法であるので、最大の反復回数を200とした。最適化手法を用いた場合、支持脚切り換え時の揺動が抑えられた。実機での実装を想定して、最大の反復回数を50とした場合においても、ピッチ角とロール角において最適化の効果を確認できた。

### 4.2 歩行方向制御における最適化

本節では、第2の課題、胴体6自由度制御における冗長入力最適化手法の開発で、歩行方向制御の最適化手法について検討した結果を報告する。最適化を行うと制御性能が悪化する結果となった。このことから歩行方向制御では、最適化を行わず、最適制御のLQI制御で得られるフィードバック制御側で十分であることが明らかとなった。

### 4.3 一部アクチュエータ故障に対する耐故障制御手法

本節では、第3の課題、胴体6自由度制御に基づく一部アクチュエータ故障に対する耐故障制御手法の開発で、姿勢制御と歩行方向制御の最適化手法について検討した結果を報告する。

歩行方向制御の3Dシミュレーション結果の一例をFig.5に示す。この場合は、Fig.3で示した6脚で、左前のLegIと右後ろのLegVIの旋回部と脛部のアクチュエータが動作しない場合について検討した結果を示す。図中で、赤の実線は脚IとVIのアクチュエータが損傷した場合で、遊脚となる脚によって、支持脚時に遊脚とするように目標軌道を変更した場合、青の破線は目標軌道を変更しない場合、緑の破線は脚が損傷しない場合の結果を示す。目標軌道を変更しない場合には、制御性能が悪化している。しかし、目標軌道を変更し、遊脚となるように変更した場合には、損傷がない場合と同様の追従性能が得られている。このことからアクチュエータが損傷した場合においても、姿勢制御同様、制御対象のモデルを変更しなくても、同様の制御性能が得られ、ロバストな制御系となっていることを確認した。

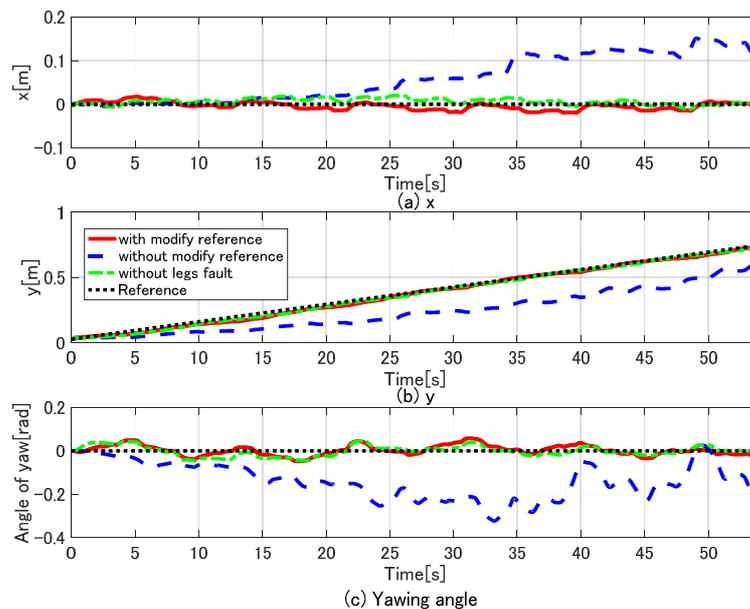


Fig. 5: Straight walking in the case that rotating and shank link of Leg I and VI are actuator fault.

### < 引用文献 >

- [1] H. Uchida, Trajectory tracking control for six-legged robot by correction of leg link target trajectories based on LQI control, International Journal of Control Science and Engineering, Vol.6, No.1, pp.1-11, 2016.
- [2] Nelder, John A., R. Mead., A simplex method for function minimization, Computer Journal, Vol.7, 308/313 (1965)
- [3] H. Uchida, Six-degree-of-freedom control by posture control and walking directional control for six-legged robot, Journal of Mechanical Engineering and Automation, Vol.7, No.2, pp.30-45, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroaki Uchida	4. 巻 7(2)
2. 論文標題 Six-degree-of-freedom Control by Posture Control and Walking Directional Control for Six-legged Robot	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical Engineering and Automation	6. 最初と最後の頁 30-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5923/j.jmea.20170702.02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 HIROAKI UCHIDA
2. 発表標題 Optimization of Feedback Control Inputs for Posture Control of a Six-legged Robot
3. 学会等名 The 21st International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内田 洋彰
2. 発表標題 最適化手法を用いた6脚ロボットの姿勢制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryohei HAMADA, Hiroaki UCHIDA
2. 発表標題 Optimization of control input for posture control of six-legged robot
3. 学会等名 3rd International Workshop on Effective Engineering Education (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroaki UCHIDA, Masashi Hosoi
2. 発表標題 Localization Method using the ICP Algorithm for a Six-Legged Robot
3. 学会等名 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines (CLAWAR2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考