3D プリンタを用いた分布型接触センサの開発と事象駆動型 6 脚移動ロボットの反射制御

Development of distributed contact sensor using a 3D printer and reflex control for an event-driven hexapod robot

○学　藤井海斗（名古屋大）　　学　村田勇樹（名古屋大）
正　稲垣伸吉（名古屋大）　　正　鈴木達也（名古屋大）

Kaito FUJII, Nagoya University, fujii.kaito@c.mbox.nagoya-u.ac.jp
Yuki MURATA, Nagoya University
Shinkichi INAGAKI, Nagoya University
Tatsuya SUZUKI, Nagoya University

In this paper, we propose a method of manufacturing a tactile sensor using 3D printer and pressure sensitive conductive rubber. Furthermore, we propose to incorporate reflex control to avoid stumbling into Follow-the-Contact-Point(FCP) gait control. With this method, the robot performs reflex movement and prevent stumbling what is impossible with original FCP gait control. We verify whether the walking ability of the robot improves by introducing the sensor and reflex control on the real robot.

***Key Words*:** Tactile sensor, Reflex control, Hexapod Robot, FCP Gait Control

1　はじめに

災害現場など，人間が活動するには危険な不整地環境で活動できるロボットが必要とされている．中でも多脚移動ロボットは脚の数が多いため，高い安定性や不整地走破能力が期待されている．稲垣らは多脚移動ロボットの分散歩行制御の方法として，「接地点追従法；Follow-the-Contact-Point (FCP) gait control」を提案した [1]．これは，先頭脚が接地した地点に後続の脚も接地し，接地点を引き継いでいく動作を，各脚の分散制御で実行することで歩行する制御法である．この制御法の利点は，すべての脚の接地点を先頭脚の接地点計画のみで決定できること，それによって計算時間が省略され制御周期を高速化できることである．しかし，接地点追従法は各脚の動作が想定した時間内に収まらない場合デッドロックに陥るという問題があった．そこで村田らは，各脚の動作時間を保証するために接地点追従法に Timekeeper 制御を追加した [2]．これにより不整地走破能力は向上したが，依然としてロボットが段差につまずいて転倒してしまう状況には対応することができていない．そこで，ロボットの脚が障害物に接触したことを検知し，つまずきを回避するような方法が求められている．

ロボットの接触を検知するため，ロボット表面に接触センサを実装して触覚を与える研究が数多くなされてきた [3]～[6]. しかしながら，複雑な形状のロボットの表面を被覆できるセンサを作成することができる方法はまだ少なく，さらなる研究が必要であるといえる．

また，つまずき回避の研究もこれまで行われてきたが，接地点追従法への適応はいまだ行われていない [7]．本稿では，ロボット表面を被覆可能なセンサを 3D プリンタを用いて開発する．また，ロボットが障害物につまずく現象を回避するための反射制御を実装する．そして，実機を用いて反射制御の検証を行う．

2　ロボットの構造と接地点追従法の概要（文献 [2] から抜粋）

2.1　ロボットの構造

本稿では，Fig.1 のような 6 本の脚が胴体から放射状に配置された 6 脚ロボットを用いる．このうち胴体から見て進行方向にある 2 脚を先頭脚とし，先頭から i 番目の脚を右側では Leg[i], 左側では Leg[$i+3$] とする．そして，脚 Leg[i] の付け根に原点を持つデカルト座標系 Σ_i を定義し，本研究で用いる脚先座標は Σ_i 上のものとする．また，Ω_i は座標系 Σ_i における脚先の可到達域を表す．さらに，胴体の中心を原点としたデカルト座標系 Σ_{body} を定義し，本研究で用いる胴体座標は Σ_{body} 上のものとする．また，胴体上方には Depth センサが搭載されており，これにより操縦者はロボット前方の点群から先頭脚の接地点を選択することができる．

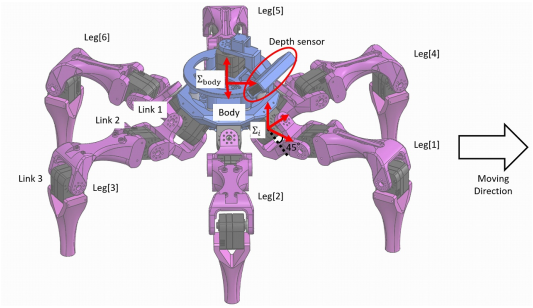

Fig.1 Robot structure and local coordinate system

2.2　接地点追従法

接地点追従法は自脚と前後及び対となる脚の状態により制御モードを切り替える分散型かつ事象駆動型の歩行アルゴリズムである．結果的に上位層で計画された最前脚の接地点を後に続く脚が受け継いでいく歩容をとる．各脚の制御にはグローバル情報を用いずとも，ロボット全体が接地点計画を反映した歩行を実現することが出来る (Fig.2)．各脚はそれぞれ，4 つの制御モードを 1,2,3,4,1 $\cdots$ と順番に遷移を繰り返す．以下に各モードの説明をする．ただし，モード 2 以外の各制御モードの終了時に脚先が到達する目標点をそれぞれ P_1,P_3,P_4 とする．

2.2.1　制御モード 1：

脚先を地面から離し，Σ_i に定義される空中の中間点 P_1 に向かって動かす．脚先が P_1 に到達したら，制御モード 2 へ遷移する．

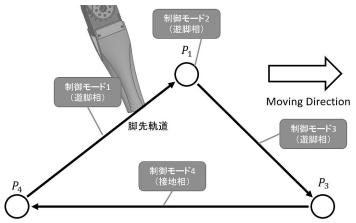

Fig.2 Leg tip movement

2.2.2 制御モード 2：

脚先を中間点 P_1 に待機させる．前方の脚 Leg$[i-1]$ の脚先が自脚の Ω_i に侵入したら，制御モード 3 に遷移する．先頭脚の場合は，Depth センサを用いて接地点を計画し，接地目標点 P_3 を Ω_i 内から選択する．計画が終了したら制御モード 3 に遷移する．

2.2.3 制御モード 3：

新たな接地目標点 P_3 に向かって脚先を動かす．先頭脚以外の場合，P_3 とは前方の脚 Leg$[i-1]$ の脚先の位置である．先頭脚の場合は制御モード 2 で計画した P_3 である．脚先が P_3 に到達したら制御モード 4 に移行する．

2.2.4 制御モード 4：

脚先を接地させたまま胴体を前進させる．Σ_i 上で脚先を捉えると，接地点は胴体の推進，旋回に対して反対方向に移動する．この時の移動速度と移動方向は，後述する目標胴体軌道と目標姿勢角に依って，1 ステップ毎に更新される．制御モード 1 に遷移する条件は，後方の脚 Leg$[i+1]$ が自脚 Leg$[i]$ の接地点を引き継いでいて，かつ Leg$[2n+i-1], n \in \mathbb{Z}$ に該当する 3 脚すべてが接地しているとき，制御モード 1 に遷移する．ただし，最後脚に関しては，後続の脚がないため，Leg$[2n+i-1], n \in \mathbb{Z}$ に該当する 3 脚のみが接地するまで待つ．

3 センサの開発

銀と樹脂を一体で成型することができる Voxel8 3D Printer と感圧導電性ゴムを用いて接触センサを作成した．3D プリンタを用いて脚のパーツとなる土台部分と電極部分を一体成型し，その上に感圧導電性ゴムをかぶせることで接触センサとした．感圧導電性ゴム部分に圧力が加わることで電極間の抵抗値が小さくなりセンサ両端の電圧が変化するのを，マイコンを用いて検出する (Fig.3)．

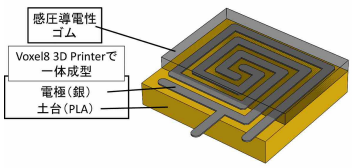

Fig.3 Structure of sensor

3.1 センサ性能の検証

センサの上に重りを落とした時のセンサ両端の電圧の変化と反応までの時間を計測する実験を行った．実験装置は Fig.5 のようである．フォトインタラプタと一定間隔で溝を掘ったプレートを用いて 2 相のリニアエンコーダを作成した．その先端に重りを固定して，重りの位置を検出できるようにした．フォトインタラプタの出力信号はマイコンで処理し，重りの位置に変換する．重りの位置がセンサと接触する位置になった時にデジタル出力ピンを HIGH にするようなプログラムを組んだ．そしてこのデジタル出力ピンをオシロスコープに接続した．センサは 5 V にプルアップし，オシロスコープに接続した．

オシロスコープで計測したセンサ上に重りを落とした時の電圧の変動は Fig.6 のようであった．青色の線はリニアエンコーダの出力であり，重りがセンサとの接触位置に達した時に立ち上がる．赤色の線はセンサの出力であり，重りがセンサと接触してゴムの抵抗値が小さくなると電圧が下がる．測定した値は次の通りである：

遅れ時間 [ms]: 初めの衝突で Arduino の出力が 4 V を上回った時刻と，センサの出力が 3.5 V を下回った時刻の差．

最小電圧 [V]: 初めの衝突の時のセンサの出力の最小値．

遅れ時間は 1.3〜1.7 ms 程度であった．6 脚ロボットの制御周期は 50 ms 程度であるため，この値は十分小さい．また，最低電圧は 0.4〜0.8 V 程度であった．これも接触を検出するために十分小さいといえる．以上より，3D プリンタと感圧導電性ゴムを用いて作成したセンサはロボットの接触を検知するのに十分な性能を有していると判断した．

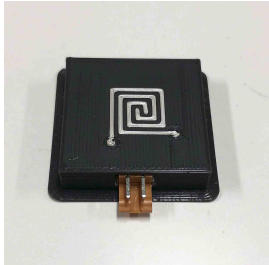

Fig.4 Electrode of sensor

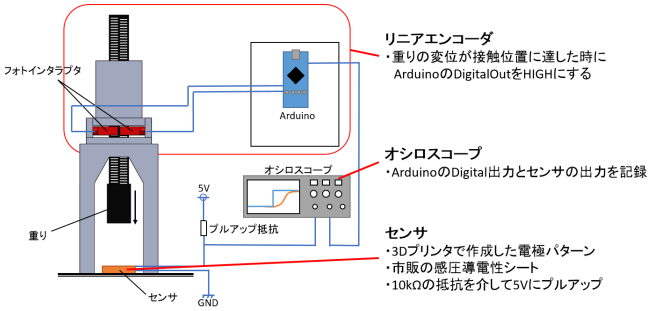

Fig.5 Structure of experimental equipment

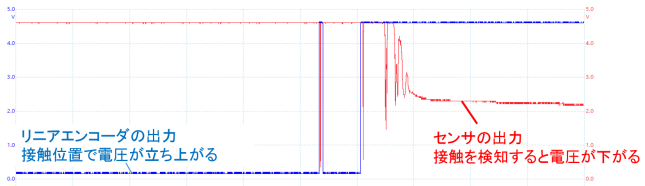

Fig.6 Output voltage

3.2 センサを組み込んだ脚

Fig.7 のように印刷面と平行に正極と負極を並べた電極を作成した．電極は脚の内部で接続されている．この電極を用いて Fig.8 のような脚を作成した．

4 反射制御

ロボットの脚が障害物に接触した時に脚を引っ込める動作を行うことで，ロボットがつまずくことを防ぐ．ただし，ここでいう

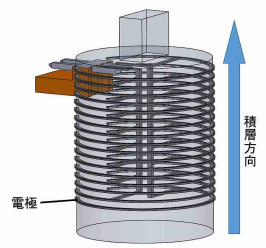

Fig.7 Electrode of Leg with sensor

Fig.8 Leg with sensor

つまずきとは，脚の障害物への予期せぬ衝突と定義する．

4.1 接地点追従法への導入

先頭脚の接地点追従法に反射制御を行う反射モードを追加した．反射制御を追加した場合の先頭脚の制御モードの遷移を，Mealy 型のオートマトンで記述した (Fig.9)．Mealy 型のオートマトンにおける状態遷移は，

$$\text{inEvent}[\text{guard}]/\text{outEvent};\ldots;\text{outEvent} \tag{1}$$

と記述できる．入力イベント“inEvent”が発生し，ガード条件“guard”が成り立つとき，状態遷移とともに出力イベント“OutEvent”を発生する．それぞれの項は省略することができ，特に，入力イベントもガード条件も省略されている場合 (/...) は，常に状態遷移と出力イベントの生成が行われる．また，出力イベントが省略されている場合 (.../) は，遷移のみが行われる．[8]

接地点追従法の遊脚相のうち，脚を動作させるモード 1 とモード 3 において接触を検知した場合に反射モードへ遷移するようにした．先頭脚の反射制御の流れは次のようである．

- 接触を検知すると sensor_flag を立てる．
- 制御モード 1 または 3 で sensor_flag が立っているとき反射モードに遷移する．
- 反射動作によって脚先を移動させる点 (反射終了点) を設定する．
- 反射終了点に向けて脚先を動作させる．
- 反射モード中に再び sensor_flag が立った場合，反射終了点を再設定する．
- 脚先が反射終了点に到達すると反射モードを終了する．

また後続脚は，先頭脚が反射を行った場合，先頭脚の反射終了点を引き継いで目標地点へ向かうことで，先頭脚と同じ場所でつまずくことを防止する．このように，後続脚の軌道は，先頭脚が反射動作を行うかどうかで変化するが，いずれの場合にも前脚の脚動作を引き継いで脚動作を行うということに変わりないため，新たに反射モードを追加で設けることはしなかった．

モード 1 の途中で反射モードに入った時の脚先の軌道を Fig.10 に示す．先頭脚は接触センサからの信号を検知すると反射モードに移行し，その時の脚先から脚座標系で x 軸方向に $-a$ [mm]，z 軸方向に b [mm] の地点に点 P_1'(反射終了点) を設定し，その点に向けて反射動作を行う．P_1' に到達すると反射モードを終了し，中間点 P_1 に向けて脚先を移動させる．後続脚は，先頭脚が最終的に障害物を乗り越えることができた時の P_1' を介して，中間点 P_1 に向けて脚先を移動させる．

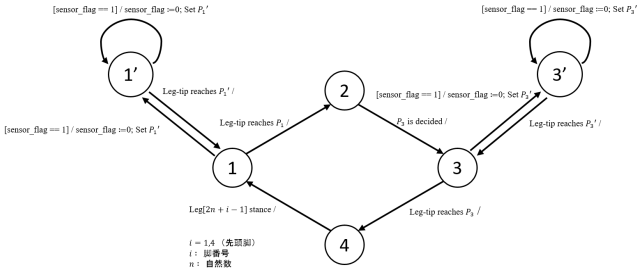

Fig.9 Control automaton with reflex mode

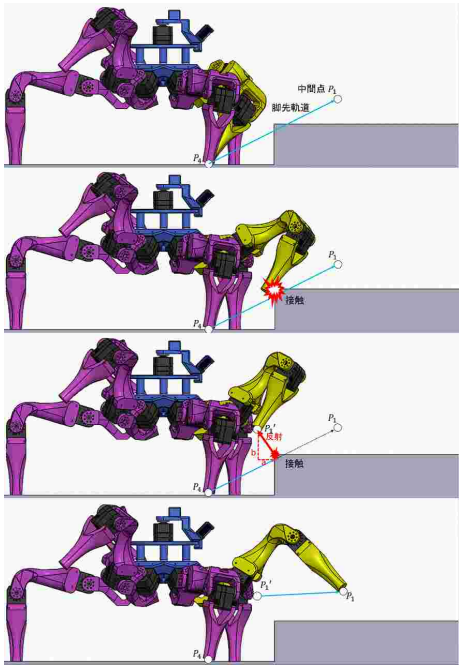

Fig.10 Movement of first leg while reflexing

5 実機実験

接触センサと反射制御を 6 脚移動ロボットに実装し，障害物に脚が接触した時に想定通りに反射制御を行うことができるか，反射制御なしの場合と比べてどの程度走破性能が向上したかを確かめるため実験を行った．

5.1 実機の構成

実験で用いたシステム全体の構成は Fig.11 の通りである．図の実線は有線通信，点線は無線通信を表している．ロボットに搭載された Depth センサでロボットの前方の深度情報とモノクロ映像を取得し，USB 接続を介して PC に送信する．ロボットの操縦者が PC で Depth センサの映像をもとに接地点を選択すると，接地点の座標が PC に接続された XBee からロボット本体のマイコンに接続された XBee に無線通信で送信される．そして，

ロボット本体のマイコンは受け取った接地点の座標に基づき先頭脚を接地させる．この操作を繰り返すことでロボットが歩行する．

本研究で使用する 6 脚移動ロボットは Fig.12 のようである．ボディは，サーボモータとセンサ部分を除いてすべて zortrax 社製 3D プリンター M200 を用いて作成した．

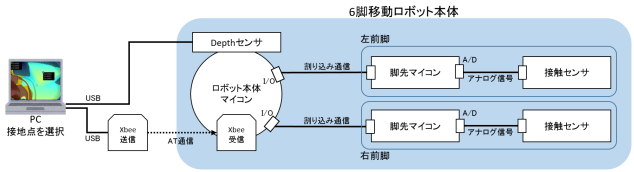

Fig.11 System structure

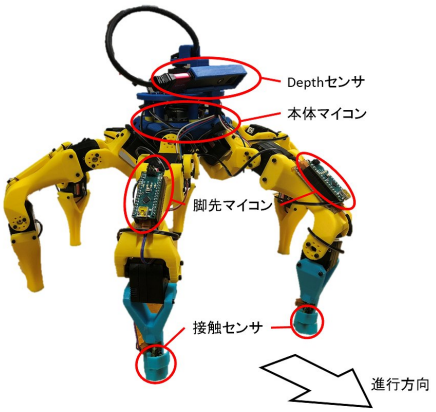

Fig.12 Robot

5.2　実験環境

実験環境を Fig.13 に示す．段差を高さ 80〜110 mm まで 10 mm 刻みで 4 種類用意した．図の位置に先頭脚を合わせて歩行を開始し，最高脚が段差の上に接地した時点で成功とする．歩行中にロボットが転倒や障害物に引っかかるなどして歩行を継続できなくなった場合は失敗とする．それぞれの環境において反射有りと無し 10 回ずつ実験を行い，成功率を記録した．

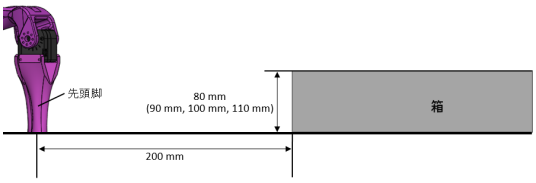

Fig.13 Environment of experiment

5.3　結果

結果は Table1 のようになった．いずれの高さにおいても，反射ありの場合のほうが成功率が高いことがわかった．また，反射制御ありの場合，Fig.14 のように段差に接触センサが衝突した時に想定通り反射動作を行っていることが確認できた．

6　おわりに

本研究では 3D プリンタと感圧導電性ゴムを用いて接触センサを作成し，それが機能することを確認した．また，6 脚ロボットにセンサを搭載し，それを用た反射制御を接地点追従法に追加することで歩行能力を向上できることを確認できた．しかしながら，反射制御を実装した場合でも依然として障害物を回避することができない場合がある．センサの開発を進め，センサが被覆できる範囲を増やすことでさらに障害物を回避できるようになると考えられる．

Table 1 Success rates [%]

段差	反射なし	反射あり
80 mm	50	70
90 mm	50	60
100 mm	10	40
110 mm	0	10

Fig.14 Movement while reflexing

謝辞

本研究は科研費 (16K0618) の助成を受けたものである．ここに謝意を表する．

参考文献

[1] 稲垣　伸吉，　丹羽　智哉，　鈴木　達也.“受動体節間関節を持つムカデ型多脚歩行ロボットの接地点追従法による分散歩行制御”, 計測自動制御学会論文集，第 47 巻　第 6 号, pp.282-290, 2006.

[2] 村田　勇樹，稲垣　伸吉, 鈴木　達也.“Timekeeper 制御を用いた接地点追従式 6 脚移動ロボットの適応歩行” 計測自動制御学会論文集，第 55 巻　第 1 号, pp.51-58, 2019.

[3] 森田 宏，本間 将人, 前野隆司, 昆陽雅司, 元島栖二, 河辺憲次．“カーボンマイクロコイルを用いた小型分布型触覚センサの開発”，計測自動制御学会論文集，第 22 巻　第 30 号, pp.331-336, 2005.

[4] Y.-J.Yang, M.-Y.Cheng, W.-Y.Chang, L.-C.Tsao, S.-A.Yang, W.-P.Shih, F.-Y.Chang, S.-H.Chang, K.-C.Fan. “An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PI-copper films”, Sensors and Actuators A 143 , pp.143-153, 2008.

[5] 中本　裕之．“ロボットハンドによる物体操作中の触覚情報を利用した認識の研究”，平成 21 年度神戸大学大学院工学研究科博士論文, 2017.

[6] Risto Kõiva, Matthias Zenker, Carsten Schürmann, Robert Haschke, Helge J. Ritter. “A highly sensitive 3D-shaped tactile sensor”, 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1084-1089, 2013.

[7] 広瀬　茂男, 福田 靖, 菊池 秀和．“4 足歩行機械の制御システム”, 日本ロボット学会誌 , 第 3 巻, 4 号, pp.304-324, 1985.

[8] 稲垣　伸吉，　丹羽　智哉，　鈴木　達也.“接地点追従法によるムカデ型歩行ロボットの不整地歩行制御”，第 27 回日本ロボット学術講演会, 1P3-02, 2009.