研究論文

空気圧駆動型 4 脚移動ロボットの開発*

(第 1 報 : 外乱オブザーバの導入によるモーションコントロール)

趙 子磊**, 高 岩 昌 弘**, 則 次 俊 郎**, 佐々木 大 輔**

Development of Pneumatic Quadruped Robot

(1st Report : Motion Control by Introducing Disturbance Observer)

ZiLei ZHAO, Masahiro TAKAIWA, Toshiro NORITSUGU, Daisuke SASAKI

We develop a quadruped walking robot, assuming human cooperative tasks in construction building or rescue activity in disaster environment. Pneumatic cylinders are employed as driving actuators since they have explosion proof and inherent compliance. Owing to the compliance feature, external force is easily estimated based on the inner pressure of the cylinder. We provided a compliance control system on each leg based on the estimated floor reaction force with disturbance observer. After giving an overview of the developed quadruped walking robot, we describe the kinematics, statics and control system of each leg. We propose a motion control strategy based on the floor reaction force estimated using a disturbance observer. The validity of the proposed control system is verified through some experiments.

Key words : words : Quadruped robot, Pneumatic actuator, Disturbance observer

1. 緒 言

ロボットに何らかの作業を遂行させる場合、ロボットの移動形態は重要な要素である。脚式機構は足先の接地点を任意に設定できるため不整地での移動に適しており、これまで地雷撤去¹⁾や法面作業²⁾、火山活動の観測³⁾、森林作業⁴⁾、さらにはエンターテインメントを目的とするもの⁵⁾などが開発されている。

本研究では、対象物の搬送等の人との協調作業や環境との接触時にも自身が変形することで柔軟に動作を遂行できるような機能を実現するため、大きさおよびパワーレベルが人と同程度である、空気圧アクチュエータを用いた 4 脚移動ロボットの開発を行う。動作媒体である空気は、防爆性を有し、環境にクリーンであるだけでなく、圧縮性に起因する低剛性特性のため、サーボ系を構成した場合でも高周波数域の外力に対して弾性体として機能し、衝突力の吸収などの安全性を有する。さらには圧縮エネルギーを容易にアクチュエータに封入できるため、傾斜面でのロボットの姿勢を長時間維持するような動作においても発熱することなく省エネルギーな動作が可能である。

本稿では開発した空気式 4 脚移動ロボットの運動制御法について報告する。まず、第 3 章で開発した移動ロボット

の概要について説明した後、第 4 章において脚部の制御手法を示す。地面と接地した際に、機構的に閉ループを構成する脚式ロボットでは脚先の位置誤差を許容するためコンプライアンス特性を脚先部に付与することが有用であり、これを実現するために、床反力に基づくコンプライアンス制御系を構築する。一般に床反力の検出には力センサーを要するが、その導入はコストだけでなく、特にフィールドロボットでは信頼性の観点からも得策でない。空気圧アクチュエータは空気の圧縮性に起因する低剛性特性のため外力の影響が制御量に現れやすいことに着目し、従来より提案されているピストン変位とシリンダ室内圧力から床反力を推定する手法⁶⁾を導入し、これらを用いたコンプライアンス制御系を脚の制御に導入する。また、ロボットの姿勢および地面傾斜角の推定手法、ならびに荷重変動にともなう ZMP (Zero Moment Point)⁷⁾について考察する。第 5 章でこれら提案された制御システムの妥当性を実機を用いた実験により確認する。

2. 主な記号

主な記号を以下に示す。添字 $j (= 1, 2, 3, 4)$ は第 j 脚のパラメータを示している。

q_j	: 関節角度ベクトル	[rad]
h_j	: 脚先の位置ベクトル	[m]
h_{rj}	: 脚先の目標位置ベクトル	[m]
h_{dj}	: 脚先の仮想目標位置ベクトル	[m]
K_j	: 剛性行列	[N/m]
f_{rj}	: シリンダの目標発生力ベクトル	[N]

*平成23年9月1日 原稿受付

**岡山大学大学院自然科学研究科

(所在地 岡山市北区津島中 3-1-1)

(E-mail : takaiwa@sys.okayama-u.ac.jp)

f_{gj}	: シリンダの発生力ベクトル	[N]
f_j	: 床反力ベクトル	[N]
J_{aj}	: ヤコビ行列	
τ_j	: 脚の関節トルクベクトル	[Nm]
u_j	: 脚の制御信号ベクトル	
K_{vj}	: シリンダにおける圧力応答に及ぼす ピストン速度の影響	[s/m]
J	: 慣性モーメント	[Nms ²]
D	: 粘性摩擦係数	[Nms]
r	: モーメントアーム	[m]
T_q, T_{pq}	: フィルタ時定数	[s]
T_{pm}	: 圧力応答時定数のノミナル値	[s]
K_{pm}	: 圧力応答定常ゲインのノミナル値	[N]

3. 4脚移動ロボットの概要

3.1 ロボット全体の概要

4脚移動ロボットの外観をFig. 1(a)に示す。ベースプレート（縦（進行方向）1,114mm, 横773mm）の四隅に3自由度シリアルリンク機構を有する脚が配置されている。進行方向に向かって、前脚右、左、後脚右、左の順に第1から第4脚と呼ぶ。脚は、ロボットの前進・後退時に同じ移動特性となるように前後対称に取り付けている。ロボット全体の重量は250kgであり、脚一本の重量は33kgである。また、ベースプレートの地面からの高さは750mmとなる時の立脚状態を基準姿勢とする。

ベースプレート上には制御用の汎用PCと各種インターフェースボードを挿入した拡張スロットが搭載されている。制御用PCのOSには高機能かつ安価に機械システムの制御系を構築できるLinux (UBUNTU 9.04) ならびにその実時間拡張であるRTAI3.8を適用しており、制御周期5msのサーボ制御を実装している。ロボットから遠隔に位置する操縦者は操縦用PC (Linux: UBUNTU 10.10) から無線LANを介してロボットに搭載した制御用PCへRemote Login (ssh) して操作する。現時点では空気圧および電源は外部から供給している。自律化のためにはこれらをロボット本体へ搭載する必要があるが今後の課題とする。

3.2 脚機構の概要

Fig. 2(a)は前脚単体の概要を示す。ベースプレート中央に基準座標系 $h = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ を設置する。ここで、 y 軸はロボットの進行方向、 z 軸は鉛直上方とし、姿勢角はロール・ピッチ・ヨー角を用いて表現する。

関節1と関節2は回転中心を同一とする直交二軸のジンバル機構となっている。関節1の回転軸であるロータリーシャフトは、ベアリングを介してベースプレートに取り付けられている。さらに、ロータリーシャフトはリンク機構を介してcylinder 1（内径80mm）のピストンロッド先端部に連結されている。即ち、cylinder 1により脚全体がロータリーシャフト回りに回転運動を行う。一方、cylinder 2（内

(a) Side view

(b) Leg of robot

Fig. 1 Developed quadruped robot

径80mm)のヘッド部はロータリーシャフトに、ピストンロッド部はleg 1に取り付けることで、cylinder 2の駆動によりleg 1は関節2の回転軸回りに運動する。また、leg 1に搭載したcylinder 3（内径100mm）はleg 2を関節3の回転軸回りに駆動する。足首の関節4、5も回転中心を同一とする直交二軸のジンバル機構であるが能動的には駆動しておらず、回転型ダンパ（株式会社不二ラテックス製、定格トルク $(2.0 \pm 0.3 \text{ Nm } 20 \text{ rpm})$ ）を取り付けている。

Fig. 2(a)に示すように、関節4、5の回転中心を脚先とし、その可動範囲を計算した結果をFig. 2(b)に示す。ここで、脚先位置は、基準座標系の原点を関節1、2の回転中心に平行移動してできる脚座標系で表現している。脚先が $z = -750 \text{ mm}$ となる位置を維持して歩行する場合は、脚先は y 軸方向に $-200 \sim 500 \text{ mm}$ 程度の範囲で可動できる。遊脚期の脚先移動量（歩幅）は、立脚期に胴体を前方（後方）に移動させるのに必要な脚先の移動量を可動範囲から除いた範囲内で設定される。

Fig. 3は空気圧シリンダ単体の空気圧駆動回路を示す。両シリンダ室内の圧力はそれぞれ電空レギュレータ（株式会社CKD製、EV2500）で調整される。制御対象をSISO（Single Input and Single Output）システムとするため、制御入力 u に対して、ヘッド側電空レギュレータの入力信号を $u_h + u$ 、ピストン側電空レギュレータのそれを $u_p - u$ としている。ここで、 u_h は供給圧力（ $p_s = 600 \text{ kPa}$ ）の半分（ 300 kPa ）となる入力値であり、 u_p はそれにつりあうように

Fig. 2 Schematic diagram of leg

Fig. 3 Pneumatic driving circuit

ピストンロッド有効断面積を考慮して求めた値である。関節の回転角度はロータリエンコーダ（株式会社ムトーエンジニアリング製，S-600）で検出し，シリンダ室内圧力は圧力センサ（株式会社キーエンス製，AP-C40）で測定する。

4. 制御系の構成

4.1 逆運動学

Fig. 4は前脚の幾何学モデルを示す。脚座標系で示した脚先の位置から各関節の回転角度 $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ を求める逆運動学は次式で与えられる。

ここで， $L_1 (=500\text{mm})$ ， $L_2 (=400\text{mm})$ はleg 1とleg 2の長さであり， $L = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$ は脚座標系原点から脚先までの距離である。

Fig. 4 Inverse kinematics

$$\begin{cases} \theta_1 = \sin^{-1} \frac{x}{L} \\ \theta_2 = \cos^{-1} \frac{L_1^2 + L^2 - L_2^2}{2 L_1 L} + \sin^{-1} \frac{y}{L} \\ \theta_3 = \cos^{-1} \left(-\frac{L_1^2 + L_2^2 - L^2}{2 L_1 L_2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

4.2 脚の制御手法

脚先の位置制御では，目標値に対して1型の位置サーボ系を構成するのが一般的である。このとき，位置偏差が生じると積分動作により位置偏差を低減する方向に脚先部は力を発生する。このような力の水平成分が床面との摩擦力以下の場合は各脚間で内力を及ぼし合い，水平方向の内力のバランスが時間とともに変化し，ベースプレートは床面に対して長周期的な振動が生じる。また，脚先の発生力が摩擦力を越えると，突発的なすべりが生じる。このような問題に対応するため，脚先部に仮想コンプライアンスを設定し，脚先部の位置偏差を許容する。コンプライアンス制御を実施するには床反力を力センサにより測定する必要があるが，コストおよびメンテナンスの観点から，外乱オブザーバを用いてシリンダの圧力に基づき推定する。

Fig. 5(a)に脚単体に構築したコンプライアンス制御系を示す。同図(b)は(a)において二重線のブロックで示した発生力制御系を示す。シリンダの発生力 $F_g (=p_1 A_1 - p_2 A_2)$ から関節角度 q までの伝達部に外乱オブザーバを構成し，床反力が等価的に外乱として関節に及ぼすトルクを推定する。ここで， r ， J ， D はそれぞれ，モーメントアーム，慣性モーメント，粘性摩擦係数であり，外乱オブザーバのフィルタは時定数 T_q の二次系とする。なお，時定数は安定範囲内で外乱抑圧特性および目標値追従特性が良好となるように $T_q = 0.05\text{s}$ に設定した。仮想仕事の原理より求められた床反力 F にコンプライアンス行列 $K^{-1} = \text{diag}[K_x^{-1}, K_y^{-1}, K_z^{-1}]$ をかけてフィードバックし，内部に位置制御系を構成している。位置制御では逆運動学により目標関節角度ベクトル q_r を求め，PDコントローラを前置き補償器とする関節サー

Fig. 5 Control system

Table 1 Moment of inertia parameter

	遊脚時kgm ²	接地時kgm ²
joint 1	0.914	27.3
joint 2	0.80	26.9
joint 3	0.165	9.22

ボを構成する。

各関節まわりの慣性モーメントをラグランジュの運動方程式から求めた結果をTable 1に示す。ロボット本体が負荷となる接地時と脚だけが負荷となる遊脚時では大きく異なることがわかる。慣性モーメントのノミナル値は接地時のものを用いている。外乱オブザーバを用いた制御系は制御対象のパラメータ変動の影響も外乱として補償する働きがあるため、遊脚と立脚を繰り返す脚の運動制御において同一の制御パラメータを使用することができ、見通しのよい制御系を設計することができる。

4.3 姿勢の検出と位置姿勢制御

歩行動作において地面の傾斜の検出は重要である。今、地面に対するベースプレートの相対的な姿勢が分かれば、加速度センサやジャイロセンサ等をベースプレート上に設置することで容易に地面の傾斜を求めることができる。そこで、本研究では地面に対するベースプレートの相対的な姿勢を以下のようにロボットの幾何学的関係から求める。

簡単のため地面は平面と仮定する。静歩行ではどの瞬間においても必ず何れか3脚が立脚状態にある。今、Fig. 6(a)に示すように第1脚（右前脚）が遊脚状態とすると、第3脚先からみた第2、第4脚先の位置ベクトル h_2-h_3 、 h_4-h_3 は地面上にあり、これらの外積から求めた地面の単位法線

ベクトル n は次式のように計算される。

$$n = \frac{(h_2-h_3) \times (h_4-h_3)}{|h_2-h_3| |h_4-h_3| \sin \theta_1} \quad (2)$$

式(2)は基準座標系で表現されているので、ロール・ピッチ・ヨー角で表現されるロボットの姿勢の回転行列を R とすると、次式の関係を満たす。

$$R \cdot n = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (3)$$

ロール角 $\phi = 0$ として展開すると、式(4)になり、これを解いて式(5)のように姿勢角 ψ 、 θ が求まる。

$$\begin{cases} n_x \cos \theta + n_y \sin \theta \sin \psi + n_z \sin \theta \cos \psi = 0 \\ n_y \cos \psi - n_z \sin \psi = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1} \frac{n_y}{n_z} \\ \theta = \tan^{-1} \left(-\frac{n_x}{\sin \psi n_y + \cos \psi n_z} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Fig. 6(b)は、ベースプレートの目標位置、姿勢が与えられたときの脚先位置ベクトルの目標値を示す。実線で示した状態から点線で示した状態にベースプレートの位置・姿勢を変位させるには上記で求めた姿勢角より求まる回転行列 R を用いて以下で計算される脚先位置ベクトル h_j を目標位置とする。

$$h_j = R^T(h_j - p) \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

4.4 ZMPの検出

ZMP (Zero Moment Point) は、ある作用点まわりに関して各脚に作用する床反力ベクトルからなるモーメントの総和が0となる地面上の点である。静歩行の場合、ZMPは重心と一致するため、歩容計画においてよく利用される。ZMPは以下で求めることができる。

Fig. 7に示すように、床面上の作用点 $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ における各脚先に作用する床反力 $f_j = [f_{jx} \ f_{jy} \ f_{jz}]^T$ ($j = 1, 2, 3, 4$)が生成するモーメントの総和は次式となる。

(a) Orientation detection

(b) Orientation compensation

Fig. 6 Orientation detection and compensation

$$\tau_j = \sum_{j=1}^4 (h_j - p) \times f_j \quad (7)$$

ZMPは式(7)の右辺の x , y 成分を0とおいて, p_x 及び p_y について解くことで, 次のように得られる.

$$\begin{cases} p_x = \sum_{j=1}^4 h_{jx} f_{jz} / \sum_{j=1}^4 f_{jz} \\ p_y = \sum_{j=1}^4 h_{jy} f_{jz} / \sum_{j=1}^4 f_{jz} \end{cases} \quad (8)$$

脚式ロボットでは, ベースプレート上に不特定荷重が作用した状態での移動も一般に考えられ, このようなZMP(重心)の計測は安定な歩容計画に不可欠である.

5. 実験結果および考察

5.1 位置制御のみの実装における問題

Fig. 8はFig. 5に示す制御系においてコンプライアンス行列の出力を0として位置制御のみを実装し, 立脚させたときの様子を示す. 実線は第1脚に作用する床反力の y 方向成分を, 点線は第1脚先の y 方向変位を示す. y 方向の目標位置200mmに対して時刻27秒程度で4mm程度の誤差となり, 脚先は床面を水平方向に急速に押し始め, 35秒近辺で摩擦力230Nを越え, 脚先がスリッしているのがわかる.

5.2 コンプライアンス制御

Fig. 9は, 外乱オブザーバによる外力推定性能を示したものである. クレーンでロボットを吊下げた状態で, 同図(a)のように脚先に20kgの負荷をゆっくりと吊るした後, 取り除いた. 同図(b)の実線は z 方向の推定力を示す. 負荷の自

Fig. 7 Floor reaction force

Fig. 8 Floor reaction force

重による力(-196N)をほぼ推定していることがわかる.

一方, Fig. 10はコンプライアンス制御性能を調べた結果である. クレーンでロボットを吊下げた状態から徐々に下ろして地面に着地させ, 再び吊り上げた時の z 方向の変位(点線)および床反力(上側実線)を示している. 太線は床反力を z 方向の設定剛性 $K_z = 50\text{N/mm}$ で除したもので, 目標変位に相当する. 着地するまでは足先変位は目標値である $h_z = -750\text{mm}$ と一致しており, 着地後は, 定常状態ではほぼ目標位置と等しくなり, 設定コンプライアンスを実現していることがわかる. このように, コンプライアンス制御の導入により, 脚先に位置偏差が生じていても一定の床反力で釣り合い安定に立脚できる.

5.3 姿勢角制御

Fig. 11はロボットの姿勢角に関するステップ応答結果を示す. (a), (b)はそれぞれ, x 軸回り(ψ 方向)に $\pm 0.1\text{rad}$, y 軸回り(θ 方向)に $\pm 0.1\text{rad}$ の目標値を矩形的に与えている. 実線は式(5)によりロボットの幾何学的関係から計算で求めた姿勢を示し, 灰色で若干振動的な実線は, 市販の加速度センサ(株式会社ゼットエムビー製, e-nuvo IMU-Z Lite)をベースプレート上に設置して計測した結果を示す. 制御には計算値を使用している. ロボットの動作がほぼ静的である場合, 加速度センサの測定値は, ほぼ重力加速度とみなしてよい. このため, z 軸まわりの回転角度は測定できないが, ピッチ, ならびにヨー角は重力加速度の方向余弦から求めることができる. 図より, ピッチ角(θ), ヨー角(ψ)ともに, 計算値とセンサの出力はよく一致しており,

Fig. 9 External force estimation

Fig. 10 Compliance control property

Fig. 11 Step response

幾何学的計算による手法の妥当性が確認できる。

5.4 地面の傾斜角度推定

地面からの相対的なロボットの姿勢を幾何学的に計算する方法と、絶対的な姿勢を検出する加速度センサを併用すれば、地面の傾斜角度を推定することが可能である。これを検証するために、Fig. 12(a)に示すように、ロボットの後脚を椅子（高さ50cm固定）上に置き、前脚は足踏み式の油圧ジャッキにて上下させることで、x軸まわりの傾斜角を自由に調整できる地面を実現した。地面に対するロボットの相対的な姿勢角は0となるように制御（基準姿勢のまま維持）し、ジャッキを足踏みを繰り返して椅子の高さよりも20cm程度高く上げた後、ゆっくり下げたときの結果をFig. 12(b)に示す。図中の点線は幾何学的関係から求めたロボットのヨー角 (ψ) の値を示す。ロボットは地面に対して基準姿勢を維持しているのほぼ0degの値を示している。一方、上側の実線は加速度センサの測定値から幾何学的に計算した値を引いたもので、地面の傾斜角に相当する。これより、脚の幾何学的関係から求めた姿勢角と加速度センサを併用することにより地面の傾斜角が推定できることがわかる。

また、下側の実線はx, y軸方向のZMPを示している。最大傾斜時にy方向のZMPが130mm程度後方へ移動している。このように、傾斜面の歩行に不可欠な地面の傾斜角度の推定、ならびに、傾斜に応じて変化する重心位置が把握できることが確認できる。

(a) Experimental setup

(b) Inclination angle and ZMP

Fig. 12 Inclination change of ground

5.5 荷重によるZMP変化

搬送作業を想定し、荷重の変化によるZMPの変位について検討する。基準姿勢で立脚した状態のロボットに対して、両前脚上部に手を置き、人（体重72kg）が懸垂をする恰好で荷重をかけた時のy方向のZMPをFig. 13に示す。荷重を取り除いた時のZMPは $y=30\text{mm}$ であるので、その位置にロボットの全重量250kgが作用していること、また、シリンダヘッド部は $y=\text{約}800\text{mm}$ の位置にあり、そこに715.9Nの荷重が作用していることから、計算でZMPを求めると $y=204\text{mm}$ となり、ほぼ妥当な結果が得られている。

Fig. 13 ZMP change with payload

6. おわりに

本稿では、開発した空気圧駆動型4脚ロボットについて、以下に示す基本的な運動制御手法について検討した。

- (1) 外乱オブザーバを応用して推定した床反力に基づくコンプライアンス制御系を構成することで、脚先の位置偏差を許容し、安定な立脚状態を維持できることを示した。
- (2) 各脚の幾何学的関係から地面に対する相対的なベースプレートの姿勢を求める手法と、加速度センサを併用することで地面の傾斜角を推定できることを示した。
- (3) 推定した床反力を用いて求めたZMPが荷重変動時にも適切に変化することを示し、荷重変動時の歩容計画に有効であることを示した。

今後は、基本的な静歩行動作⁸⁾の実現、ならびに今回提案した地面傾斜角の推定機能を利用した不整地歩行につき検討する予定である。

参考文献

- 1) J. Estremera, J.A. Cobano, P. Gonzalez de Santos: Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining, Robotics and Autonomous System, 58, p. 700-711 (2010)
- 2) 程島竜一, 土居隆広, 福田靖, 広瀬茂男, 岡本俊仁, 森純一: 4足歩行型法面作業ロボットTITAN XIの開発(基本設計と脚機構の動作実験), 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 7, p. 847-857 (2005)
- 3) John E. Bares, David S. Wettergreen: Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned, Int. J. of Robotics Research, Vol. 18, No. 7, p. 621-649 (1999)
- 4) S. Salmi, A. Halme: Implementing and Testing a Reasoning-based Free Gait Algorithm in the Six-legged walking Machine "MECANT", Control Eng. Practice, Vol. 40, No. 4, p. 487-492 (1996)
- 5) Stephan K. Chalup, Craig L. Murch, Michael J. Quinlan: Machine Learning with AIBO Robots in the Four-Legged League of RoboCup, IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, partC, Vol. 37, No. 3, p. 297-310 (2007)
- 6) 只野耕太郎, 住野亘, 川嶋健嗣: 空気圧駆動を用いた力覚提示機能を有する多自由度鉗子の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 5, p. 538-545 (2009)
- 7) H. Montes, S. Nabulsi, M. Armada: Detecting Zero Moment Point in Legged Robot, Proc. of the 7th Int. Conf. CLAWAR (2004)
- 8) 塚越秀行, 広瀬茂男: 間歇クロール歩容の提案とその生成原理, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 2, p. 301-309 (1999)