六脚ロボット COMET-IIIの予見スライディングモード歩行制御*

池戸 洋介^{*1}, 野波 健蔵^{*2}

Preview Sliding Mode Walking Control for Hexapod Robot COMET-III

Yosuke IKEDA and Kenzo NONAMI^{*3}^{*3} Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

The mine detection hexapod robot COMET-III is driven by hydraulic power. Because of the strong nonlinear characteristic of the oil pressure system, conventional classic methods produce the flattery delay to the target orbit. In the unknown environment of minefield, the robot leg must follow correctly the walking orbit. The sliding mode control has strong robustness to parameter change or disturbance, and the preview control prevents the flattery delay by using a future target value. In this paper, we design a preview sliding mode controller, which incorporate the advantages of both control theory, and so improves control performance.

Key Words: Humanitarian Demining, Hexapod Robot, Walking Robot COMET-III, Preview Control, Sliding Mode Control, Hydraulic Power

1. 緒 言

現在, 全世界には1億個以上もの地雷が埋設されており, 国際赤十字の調べでは, 毎日約70人, つまり20分間に1人が地雷の犠牲となっている。犠牲者の多くは農業, 牧畜などの体を使って労働に従事する人々であり, 障害者になることは, 働けなくなることを意味する。障害者に対する偏見が根深い社会も多く, 犠牲者は生涯二重三重の苦しみを受けつづけることになる。兵器製造の技術が進み, 1個3米ドル(約400円)程度の安さで生産され, ハイテク技術によって1分間に1000個以上もが散布されてきた地雷。それを撤去するには, ほとんど100%手作業によっているのが現状である。年間約10万個の地雷が撤去されているが, 5000個の除去につき1人の死者と2人の負傷者, つまり年間60名以上が除去作業中に実際犠牲になっているのが現状である。

著者らの研究グループは, このような問題を解決するための手段として, 危険な埋設地雷等の探知, 処理

作業を無人化して上記のような人的・経済的被害をなくすため, 歩行ロボットによる探知と処理を提案してきた⁽¹⁾⁽²⁾。歩行ロボットは移動効率においては車輪形などと比べて劣るものの, 安定かつ安全な着地点を離散的に選択できるという点で地雷探知・処理作業に極めて適しており, 地雷原における地雷や危険物の回避歩行を実現できるという特徴を持っている。静的安定性, 機動性などを考えた結果, 六脚歩行形式を採用した地雷探知ロボットCOMET-I, IIによる研究を1998年より行ってきた。そして, これらのロボットによる要素技術の開発の成果を基礎として, 実証機レベルの地雷探知ロボットCOMET-IIIを製作した。本ロボットは六脚に2本のマニピュレータを有し, 歩行用としてクローラを有している。COMET-I, IIとの大きな違いは, 電気駆動方式から油圧駆動方式となり, 自律歩行が可能となっただけでなく, 速度向上とパワー不足の改善を行った。

ロボットの歩行方法としては目標軌道を算出し, その軌道に追従するようなサーボ系を構成しており, これまで各脚の位置決め制御には設計の容易さからPD制御を用いてきた。しかしながら, 油圧駆動に起因する問題を多く抱えており, 油温の変化, 気泡の混入, 作動圧力の変化等によりシステムのパラメータが非線

* 原稿受付 2004年3月5日。

^{*1} 千葉大学自然科学研究科(☎263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。^{*2} 正員, 千葉大学工学部。

E-mail: nonami@faculty.chiba-u.jp

形的に変化することによって、良好な歩行制御が行えていなかった。スライディングモード制御は、フィードバックゲインの高速切換によってシステムの状態を切換超平面に拘束させ、その面に沿って原点に収束させる制御である。システムの挙動は切換面の特性のみに支配されるので、パラメータ変動や外乱に対して極めて強いロバスト性を有し、油空圧システムの位置制御系において大変効果がある⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、フィードバック補償だけではアクチュエータに飽和が起こり、かつ、時間遅れなどにより定常偏差が残ってしまう。地雷原において、ロボットの自律歩行を実現させるために欠かすことのできない要素として、未知環境において、オペレータが意図する歩行軌道に正確に追従する必要があることから、最適制御系に目標値の予見フィードフォワード補償を付加することで、応答を改善させる予見制御⁽⁵⁾に着目した。そこで本報では、双方の長所を取り入れることで優れた制御性能を有する予見スライディングモード制御系⁽⁶⁾(PSMC)を設計し、制御性能を改善させることにより安定した歩行を実現させた。

文献(6)では予見スライディングモード制御の理論

的提案がなされているが、その有効性はシミュレーションにとどまっている。本報では、実システムの六脚歩行ロボットにこの方法を適用し、さらに、著者らが提案しているチャタリングのない離散時間スライディングモード法により設計することで有効性を検証しているところに特徴がある。また、歩行制御は各リングごとの制御系設計で十分であることを明らかにしている。

2. COMET-IIIとモデリング

本報で制御対象となる地雷探知六脚歩行ロボット COMET-IIIを図1に、また、そのスペックを表1に示す。脚部は3自由度を有し、肩部は油圧モータにより回転を行い、腿部・けい部については油圧シリンダにより駆動する。図2に示すように、ロボットの動作はシリンダ位置をポテンショメータにより計測し、A/D変換を介して32ビットのコンピュータ(HITACHI製:SH4)により取り込み、脚先の目標軌跡に対応する各サーボ系の目標値を本ロボットの脚機構の逆運動学から算出し、これに基づいて脚制御入力を計算する。その計算された制御入力は、D/A変換を介し、比例電磁弁のアンプに送られ、弁のスプールを変位させることで可動部を動かす仕組みとなっている。

本報では、油圧駆動システムが内在する多くの非線形性や不確定性のため、正確な数学モデルを理論的に解析することは困難であると考えられることから、アンプ、バルブ、シリンダ系の開ループ特性を求めるのに際して、フィードバック系を構成して演算により制御対象の伝達関数を求める。そこで各関節に比例制御によるフィードバック系を付加し、目標値から出力までの伝達関数を獲得する。なお、以下のような仮定を基に同定を行う。

●関節軸まわりの慣性モーメントや重力等の影響は外

Table 1 Hardware specification of COMET-III

Hydraulic Pump	140kg/cm ² , 17L/min
Engine	653cc, Max Output 22ps/3600rpm Max Torque 4.65kgm
Material	Aluminium Alloy, SUS304
Crawler	Rubber Crawler
Hydraulic Tank	40L
Gasoline Tank	20L
Control Valve	26
Thigh Cylinder	φ25 × 250st, Max Speed 280mm/s
Shank Cylinder	φ30 × 175st, Max Speed 300mm/s
Leg Turn	Max Angle ± 80deg, 69deg/s
Weight	Frame+Crawler+Engine+Hydraulic Unit=1000kg, Legs=32kg × 6
Computer	SH4 (Clock frequency 198MHz) × 3

Fig. 1 Overview of COMET-III

Fig. 2 Block diagram of controlled system

乱とみなす。

●使用する片ロッド形のピストンの左右受圧面積は等しいものとする。

●各脚の数学モデルは同一のものとする。

モデルは式(1)に示すような二次系にむだ時間システムを付加したものとなった。

$$G(s) = \frac{\alpha \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2}sT}{1 + \frac{1}{2}sT} \dots\dots\dots (1)$$

ここでのむだ時間は油圧駆動システムの応答遅れであり、一次のPadé近似によりモデルに取り入れている。各関節のむだ時間は0.2sとした。なお、数学モデルの算出は左前脚(leg 1)を対象としている。同定方法はさまざまな周波数の正弦波を入力し、その出力

Table 2 Modeling parameters of leg 1

	α	ζ	ω_n	T
Shoulder	1.000	1.500	2.000	0.2
Thigh	1.000	2.928	4.477	0.2
Shank	1.000	3.028	5.507	0.2

(a) Gain

(b) Phase

Fig. 3 Bode plot of thigh

値との関係から実測値に合うようにパラメータ値を決定した。表2に得られた各関節のパラメータ値を、図3に腿部の目標値から出力までの周波数応答を示す。整合性を確かめるため、得られた伝達関数を用いたステップ応答のシミュレーションと実験結果を図4に示す。図4より、このモデルの出力と実際のモデルの出力を比較し、ほぼ正確なモデルが得られたことがわかる。同様な方法で肩部、けい部についても求めており、良好な結果を得ている。なお、今回用いている比例電磁弁の特性として、図5に示すような±0.25 V付近での入力電圧不感帯を有している。その結果、図4(a)に定常偏差が現れてしまっている。

3. 予見スライディングモード制御の構成

制御対象として、以下のような状態方程式、出力方程式で表されるシステムを考える。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \dots\dots\dots (2 \cdot a)$$

(a) Output

(b) Input

Fig. 4 Step response of thigh

Fig. 5 Dead zone of valve

$$y(k) = Cx(k) \quad \dots\dots\dots (2 \cdot b)$$

また、誤差信号を式(3)のように定義する。

$$e(k) = R(k) - y(k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$x(k)$: 状態変数ベクトル ($n \times 1$)

$y(k)$: 出力変数ベクトル ($m \times 1$)

$u(k)$: 入力変数ベクトル ($r \times 1$)

$R(k)$: 目標値信号ベクトル ($m \times 1$)

$A: n \times n, B: n \times r, C: m \times n$

式(2・a), 式(2・b)で表される系は可制御, 可観測とする。1形最適サーボ系を構成するため, 式(4)のような拡大系で表す。なお, Δ は1階差分を示す記号である。

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \Delta R(k+1) \quad \dots\dots (4 \cdot a)$$

または

$$X_0(k+1) = \Phi X_0(k) + \Gamma \Delta u(k) + \Gamma_R \Delta R(k+1) \quad \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

ここで, M_R ステップ未来までの目標値が既知であるとし, 次のような未来目標値信号をその中に含んだ拡大系を構成する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$\begin{bmatrix} X_0(k+1) \\ X_R(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{PR} \\ 0 & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0(k) \\ X_R(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad \dots\dots\dots (5 \cdot a)$$

または,

$$\bar{X}_0(k+1) = \bar{\Phi} \bar{X}_0(k) + \bar{\Gamma} \Delta u(k) \quad \dots\dots\dots (5 \cdot b)$$

ただし、

$$X_R(k) = \begin{bmatrix} \Delta R(k+1) \\ \Delta R(k+2) \\ \vdots \\ \Delta R(k+M_R) \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_{PR} = [\Gamma_R \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & I_m & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & I_m \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

..... (6)

ここで, 式(5)を安定に制御するような制御入力を求めるために, 最適レギュレータ理論を適用する。そこで, 次のような二次形式評価関数を定義する。

$$J = \sum_{k=-M_R+1}^{\infty} \begin{bmatrix} X_0^T(k) & X_R^T(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0(k) \\ X_R(k) \end{bmatrix}$$

$$+ \Delta u^T(k) H \Delta u(k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし, Q は正定行列あるいは半正定行列 ($Q = (Q^{1/2})^T Q^{1/2}$ と書いたとき ($Q^{1/2}, \Phi$) は可観測), H は正定行列である。

これより, 全系が安定化できることにより誤差変数 $e(k)$ が $k \rightarrow \infty$ で $e \rightarrow 0$ となるので, 目標値との誤差なく収束することができる。この式(7)を最小とするような制御入力は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= \bar{F} \bar{X}_0(k) \\ &= F_0 X_0(k) + \sum_{j=0}^{M_R} F_R(j) \Delta R(k+j) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \bar{F} &= [F_0 \quad F_R] \\ F_0 &= -[H + \Gamma^T P \Gamma]^{-1} \Gamma^T P \Phi \\ F_R(0) &= 0 \\ F_R(j) &= -[H + \Gamma^T P \Gamma]^{-1} \Gamma^T (\xi^T)^{j-1} P \Gamma_R \quad (j \geq 1) \\ \xi &= [I - \Gamma [H + \Gamma^T P \Gamma]^{-1} \Gamma^T P] \Phi \\ P &= Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P \Gamma [H + \Gamma^T P \Gamma]^{-1} \Gamma^T P \Phi \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

次に, スライディングモードサーボ系を予見スライディングモードサーボ系へと拡張する。手順はスライディングモード制御器および超平面を設計し, 状態量 $\bar{X}_0(k)$ を零にするようなレギュレータ問題として考え, それを実現可能とする制御入力 $u(k)$ を求める。ここで

$$\bar{\sigma}(k) = \bar{S} \bar{X}_0(k), \quad \bar{S} \bar{\Gamma} > 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる切換関数を考える。ここでスライディングモード制御の入力として二つの独立した項から構成される入力を式(11)と定義する。

$$\Delta u(k) = \Delta u_{eq}(k) + \Delta u_{nl}(k) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし, ここでの $\Delta u_{eq}(k)$ はスライディングモード制御の超平面に拘束するための入力であり, $\Delta u_{nl}(k)$ はスライディングモード領域にない状態から, 領域内に到達させるための入力である。これらの制御入力を式(12), 式(13)のように定義する⁽⁷⁾。

$$\Delta u_{eq}(k) = -(\bar{S} \bar{\Gamma})^{-1} \bar{S} (\bar{\Phi} - I) \bar{X}_0(k) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta u_{nl}(k) = -\eta (\bar{S} \bar{\Gamma})^{-1} \bar{\sigma}(k) \quad \dots\dots\dots (13)$$

なお, η は $0 < \eta < 2$ の範囲であれば漸近安定となり, $0 < \eta < 1$ の範囲であればチャタリングのないスライディングモード制御ができることが知られている⁽⁷⁾。ここで, 切換超平面を $\bar{S}$ の代わりに式(8)に示す最適サーボ系のフィードバック係数 $\bar{F}$ を用いることで $u_{eq}(k)$ と $u_{nl}(k)$ がそれぞれ式(14), (15)として成り立つ。

$$\Delta u_{eq}(k) = -(\bar{S} \bar{\Gamma})^{-1} \bar{S} (\bar{\Phi} - I) \bar{X}_0(k)$$

Fig. 6 Block diagram of Preview Sliding Mode Control (PSMC)

Fig. 7 Performance index value

$$\begin{aligned}
 &= -(F_0 \Gamma)^{-1} \left[F_0 (\Phi - I) X_0(k) \right. \\
 &\quad + [F_0 \Gamma_R - F_R(1)] \Delta R(k+1) \\
 &\quad \left. + \sum_{j=2}^{M_R} [F_R(j-1) - F_R(j)] \Delta R(k+j) \right] \quad \dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta u_{nl}(k) &= -\eta (\bar{S} \bar{\Gamma})^{-1} \bar{\sigma}(k) \\
 &= -\eta (F_0 \Gamma)^{-1} \left[F_0 X_0(k) + \sum_{j=1}^{M_R} F_R(j) \Delta R(k+j) \right] \quad \dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

式(14), (15)より予見スライディングモード制御の入力は以下のように表される。

$$\Delta u(k) = \Delta u_{smc}(k) + \Delta u_{fr}(k) \quad \dots\dots (16)$$

ただし,

$$\Delta u_{smc}(k) = -(F_0 \Gamma)^{-1} [F_0 (\Phi - I) + \eta F_0] X_0(k) \quad \dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta u_{fr}(k) &= -(F_0 \Gamma)^{-1} \left[F_0 \Gamma_R \Delta R(k+1) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{j=1}^{M_R} [F_R(j-1) - (1-\eta) F_R(j)] \Delta R(k+j) \right] \quad \dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

式(16)で表される第1項は式(17)のように表されるスライディングモード制御入力, 第2項は式(18)のように表される未来目標値を用いた予見フィードフォ

Table 3 Design parameters of PSMC

Shoulder	
SMC	$Q = \text{diag}[200 \ 10 \ 10 \ 100]$ $H = 0.4, \ \eta = 0.2$
Observer	$L = \begin{bmatrix} -1.0057 \\ 7.4849 \times 10^{-3} \\ -7.9884 \times 10^{-5} \\ 3.9912 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$
Thigh	
SMC	$Q = \text{diag}[20000 \ 10 \ 10 \ 100]$ $H = 0.4, \ \eta = 0.8$
Observer	$L = \begin{bmatrix} -1.0012 \\ 1.1015 \times 10^{-2} \\ -2.5096 \times 10^{-5} \\ 1.2787 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$
Shank	
SMC	$Q = \text{diag}[10000 \ 10 \ 10 \ 100]$ $H = 0.4, \ \eta = 0.3$
Observer	$L = \begin{bmatrix} -1.0001 \\ 7.0988 \times 10^{-4} \\ -1.7545 \times 10^{-7} \\ 1.3818 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$

ード制御入力である。したがって, 予見スライディングモードサーボ系の構成は図6に示すようになる。なお, 制御器を実機に実装する場合においては状態量の観測が行えないため, オブザーバを用いた状態推定を行っており, 本研究では同次元オブザーバを適用している。

4. シミュレーション

図5の不感帯を有している本制御対象に対し, シミュレーションにて本研究手法が有効であることを実証する。ここで, 予見ステップ数については式(7)を解析的に求め, 図7に示すように横軸に予見ステップ数を示し, 縦軸に予見ステップ数が零の場合に対する評価関数値の割合を示している。これより予見補償により評価関数値が大幅に低減することがわかる。なお, 図7より各関節ともに評価関数値が最も小さい予見ス

ステップ数 $M_R=15$ として設計した。これは実機に実装する際に予見ステップ数を同一にすることで、プログラムの記述が簡略化できるためである。また、用いた各関節における重み行列 Q , H , そしてオブザーバゲイン L はそれぞれ表3のように設計しており、演算時間は計算機の演算処理速度を考慮し、目標値を求めるための逆運動学の計算、制御入力の変換等を合わせて 50 ms として計算している。 η の設計においては、値を大きく設定してしまうと制御入力のチャタリングが起こってしまうだけでなく、高圧下で使用される油圧駆動システムでは、機器の破損や突発的なサージ圧を引き起こす原因となるほかに、制御対象をモデル化する際に無視した高周波域を励振し、スピルオーバーなどの発振を引き起こす可能性があり、非常に危険となる。しかし、 η の値を極端に低く設定してしまうとスライディングの動作が遅くなり、スライディングモードのロバスト性が失われてしまう。よって、実験による試行錯誤の末に設計している。この設計値も表3に示す。

(a) Output

(b) Input

(c) Sigma

Fig. 8 Simulation results of thigh (leg 1)

シミュレーションを行うにあたり、実際は各関節の支持脚時にパラメータ変動や外乱入力が起こると考えられることから、10~12.5 s にパラメータ変動させ、17.5~18 s でステップ外乱を与えている。その時の左前脚 (leg 1) の腿関節のようすを図8に示す。この結果より予見スライディングモード制御は離散時間系のために純粋なスライディングモードにはならず、準スライディングモードを生じるためにパラメータ変動や外乱入力に対しわずかに影響を受けるものの、各関節ともに PD 制御に比べ、応答性能の良さが表れているのが見受けられる。ただし、PD ゲイン (比例ゲイン K_p , 速度ゲイン K_d) は図9~11に示す。また、予見制御と比較すると、予見制御はパラメータ変動に対し、応答性が予見スライディングモード制御に比べて振動的になっており、その時に大きな制御入力が印加されているのがわかる。よって本制御対象に対し、予見スライディングモード制御が有効であるといえる。

(a) Output

(b) Input

(c) Sigma

Fig. 9 Experimental results of shoulder (leg 1)

5. 歩 行 実 験

本手法の有効性を、COMET-IIIの四脚歩行(Tetrapod)で歩行させたときの実験により検証する。なお、設計値は表3を用いている。

まず、図9～11に歩行1周期25sの各関節における出力値と入力値、それにスライディングモードの切換関数を示す。なお、比較対象のために従来の制御手法であったPD制御も示している。実際には予見スライディングモード制御が離散時間系のために純粋なスライディングモードにはならず、準スライディングモードを生じるために外乱等に対しわずかに影響を受けることがあるが、結果より、予見スライディングモード制御はPD制御に比べ位相特性が大幅に改善され、追従性能が増しているがわかる。しかし、図10(a)の6～9s付近では追従性の劣化が生じている。これはプラントへの制御入力がい小さいことから、図5に示した不感帯の影響が大きく現れているのが原因と考えられる。この問題の解決法として、サンプル目標値間隔を

大きく取れば制御入力が大きくなることから、この影響はもう少し低減できると思われる。また、図9(c)、図10(c)、図11(c)から、サンプル目標値間隔の大きい遊脚時の約0～8sでは支持脚時に比べ、切換関数が変化している。これは予見スライディングモード制御の特徴としての切換面が目標値に先立ち変化するという特徴⁽⁶⁾が示されている。

次に、左後脚(leg 3)の腿関節に同一の制御器を用いた結果を図12に示す。この結果から、2章の仮定が有効であると同時に、本制御器のロバスト性を示す結果となっていることがわかる。なお、他の脚すべての関節においても同様の結果が得られている。

次に、実測による各関節の応答波形から脚機構の順運動学に基づいて算出した左前脚(leg 1)の先端が1周期に描いた軌道の結果と、目標値との絶対誤差を図13に示す。なお、座標系としては、X軸を進行方向、Y軸を水平方向、Z軸を鉛直方向の大地座標系と定義している。同様に、比較対象として従来の制御法であるPD制御による軌道追従も示す。この結果からわ

(a) Output

(a) Output

(b) Input

(b) Input

(c) Sigma

(c) Sigma

Fig. 10 Experimental results of thigh (leg 1)

Fig. 11 Experimental results of shank (leg 1)

かることは、Y 軸の目標軌道は一定としており予見スライディングモード制御と PD 制御の違いがほとんど見られないが、X 軸、Z 軸においては予見スライディングモード制御による位相特性の改善により正確な位置決めを可能とし、脚先の軌道の正確性が明らかとなっている。特に PD 制御では脚先軌道と目標位置の誤差が最大 3.3 cm あることから、危険な地雷原を歩行させるには適切でないと考えられる。よって予見スライディングモード制御の有効性が示された結果となった。

6. 結 言

本報では油圧駆動方式を採用した COMET-III を用いて目標値から出力までの伝達関数を二次系に一次の Padé 近似を付加したものとして導出し、予見スライディングモード制御器を用いた歩行の有効性を従来の PD 制御器と実験により比較することにより検証した。

PD 制御では、油圧システムがむだ時間やその他の

(a) Output

(b) Input

(c) Sigma

Fig. 12 Experimental results of thigh (leg 3)

非線形特性を有するために追従性の劣化が見られたが、本制御手法である予見スライディングモード制御ではスライディングモード制御によってパラメータ変動に応じることなく、かつ、予見フィードフォワード補償により位相特性が大幅に改善され、良好な軌道追従性能が得られた。本報では制御対象である COMET-III の支持脚時の数学モデルの検出は困難と考え、支持脚時は遊脚時のモデルをそのまま適応したが、実際には遊脚時と支持脚時ではモデルの違いは大

(a) X-axis

(b) Y-axis

(c) Z-axis

(d) Tracking error

Fig. 13 Experimental results of trajectory control (leg 1)

きいと考えられる。よってさらなる性能の向上を考えるならば、支持脚時のモデルは遊脚時にかかる外乱と考え、この外乱信号を予見制御系の中に組入れることにより向上が見込まれる⁽⁵⁾。また、状態推定を行うにあたり同次元線形オブザーバではなく非線形 VSS オブザーバを設計することにより、さらなるロバスト化を図ることができると考えられる。

なお、COMET-IIIでは油圧駆動系において比例電磁弁を使用しており、その影響で不感帯を有していることから応答が振動的になっていたが、サーボ弁を用いることでその問題を解決できると考えている。

文 献

- (1) Huang, Q.-J. and Nonami, K., Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control, *J. Mech.*, **13** (2003), 773-790.
- (2) Nonami, K., ほか 7 名, Development of Mine Detection Robot COMET-III, *JSME Int. J., Ser. C*, **46** 3 (2003), 881-890.
- (3) 横田眞一・笹尾正典・一柳健, 油圧ショベルのブーム、アーム系の高精度奇跡制御, *機論*, **62**-593, C (1996), 161-167.
- (4) 山田宏尚・武市教児・武藤高義, 油圧パワーショベルのスライディングモード制御, *機論*, **68** 670, C (2002), 146-152.
- (5) 土谷武士・江上正, デジタル予見制御, (1992), 産業図書.
- (6) 佐藤匡・土谷武士・江上正, 離散時間予見スライディングモードサーボ系とその特性, システム制御情報学会論文誌, **14** 12 (2001), 582-592.
- (7) 野波健蔵・田宏奇, スライディングモード制御, (1994), コロナ社.

(1) Huang, Q.-J. and Nonami, K., Humanitarian mine