

## F-1228 凹凸路面を走行する移動マニピュレータの運動制御

-GA を用いた路面形状推定と動力学補償法の実機による評価-

## Motion Control of Mobile Manipulators Traveling on Irregular Terrain

-Estimation of Terrain Shapes Using GA and Evaluation of Inverse Dynamics Compensation with Experiments-

○学 塚田茂和(富山大), 正 羽多野正俊(富山大), 正 大住剛(富山大)

正 小原治樹(富山大), 正 高瀬博文(富山大)

○ Shigekazu Tsukada, Masatoshi Hatano, Tsuyoshi Ohsumi, Haruki Obara  
Hirofumi Takase; Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama, 930-8555

**Abstract:** We propose an inverse dynamics controller using the genetic algorithm (GA) for moving operations performed by a mobile manipulator traveling on unknown irregular terrain. When a mobile manipulator travels on irregular terrain, the mobile manipulator's hand is subjected to influences of disturbance torques generated by irregularities. In this paper, we developed a dynamic compensation controller using the GA and evaluated its control performance. Then, it is shown that the proposed controller can estimate a terrain shape and can decrease control errors against disturbance torques.

**Key word:** Mobile manipulator, Inverse dynamics compensation, GA, Irregular terrain

## 1 緒言

本研究の目的は、カメラ等の外部センサを用いることなく、凹凸路面を走行しながら作業を行う移動マニピュレータの手に正確な作業を行わせることである。人工建造物の床面にも凹凸は存在し、その形状は一般に未知であるため、その形状に起因した制御誤差が発生する。本報では、モデルに基づく補償トルク算出コントローラを構成し、制御誤差情報を利用して遺伝的アルゴリズム(GA)により路面形状を推定する手法を提案する。さらに実験を行い、提案したコントローラにより路面形状を推定し、動力学補償が可能であることを示す。

## 2 路面および移動マニピュレータのモデル

移動マニピュレータはある環境内を周回しながら作業を行うことが多く、このような作業環境の走行路面のモデルはフーリエ級数を用いて関数  $f(x)$  で定義できる<sup>1)</sup>。

$$f(x) = \frac{a_0}{L} + \frac{2}{L} \sum_{s=1}^{\infty} (a_s \cos c_s x + b_s \sin c_s x) \quad (1)$$

本報で用いる Fig.1 に示す 2 次元垂直平面内の凹凸路面を走行する移動マニピュレータモデルの運動方程式は (2) 式で表される<sup>1)</sup>。

$$M\ddot{p} + h + g + k = \tau_M + U_t f_t + U_n R^{-1} \left[ -\frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial C}{\partial p} \dot{p} \right) + \frac{\partial C}{\partial p} M^{-1} \{ h + g + k - \tau_M - U_t f_t \} \right] \quad (2)$$

$k$  は摩擦項である。

## 3 GA を用いた補償トルク算出コントローラ

## 3.1 補償トルク算出コントローラ

次に、(2) 式を進行方向の運動について座標変換を行い逆動力学を考え、制御力である  $f_t$  及び  $\tau_M$  のみについて式を導出し加速度項にフィードバック補償器を設けると補償トルク算出コントローラは (3) 式となる。

$$\begin{aligned} [f_t, \tau_M]^T &= \bar{M} u_q + \bar{h} + \bar{g} + \bar{k} \\ u_q &= \ddot{p}_d + K_p e + K_v \dot{e} \end{aligned} \quad (3)$$

$K_p$  及び  $K_v$  は位置、速度のフィードバックゲインを表す。ここで、 $\bar{p}$  に含まれる  $\alpha$  が路面形状  $f(x)$  の関数である。

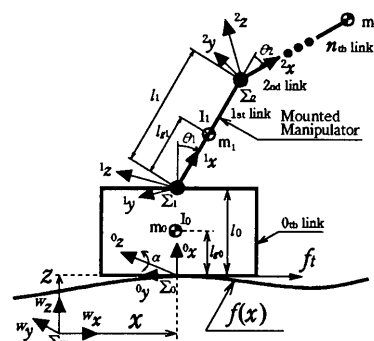


Fig. 1 Mobile manipulator model on  $f(x)$

## 3.2 GA による路面形状の更新

路面形状の推定はすなわち (1) 式の  $a_s$  及び  $b_s$  ( $s = 1 \sim \infty$ ) の値を求めることである。しかし、制御対象の入出力情報のみで、その非線形モデルの同定を行うことは困難であることはよく知られている。そこで GA を用いて上記の  $a_s$ ,  $b_s$  の組み合わせ問題を解く手法を提案する。

(1) まず  $s = 1$  とし、(1) 式において  $s = 1$  とした時の  $\hat{f}(x)$  を決定する。一方、個体の情報を決定する遺伝子型  $G_k$  を (4) 式のように決定する。

$$G_k = \overbrace{0101 \dots 1001}^{\hat{a}_s} \dots \overbrace{\dots}^{\hat{b}_s} \quad (4)$$

ただし各遺伝子を 2 進コードで記述するため、まず  $\hat{a}_s$  及び  $\hat{b}_s$  を決定し、これらに例えば  $\hat{a}_1 = 0.01 \hat{a}_1$  と係数を掛けることにより、望みの桁数に変換する。

(2) 次に、各個体により決定される  $\hat{a}_s$ ,  $\hat{b}_s$  の組み合わせを用いて  $\hat{f}(x)$  の値を決定し (3) 式に代入し、 $f_t$ ,  $\tau_M$  を計算する。

(3) 計算された  $f_t$ ,  $\tau_M$  を移動マニピュレータに入力し運動させ、制御誤差を計算する。

(4) 制御誤差の少ない個体順に並び替え、淘汰、交差、突然変異、増殖の操作を行い次世代の個体を生成する。

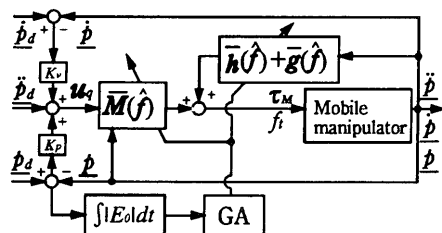
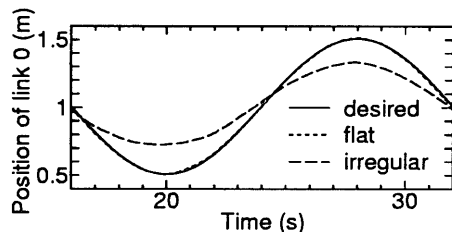
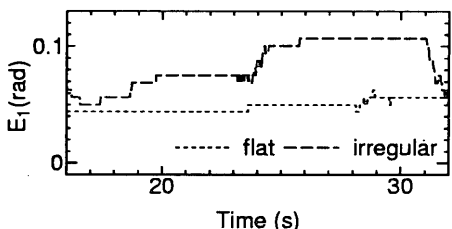


Fig. 2 Block diagram of the proposed controller



(a) Position response of link 0



(b) Error response  $E_1$  of link 1

Fig. 3 Errors in case of  $\hat{f}(x)=0$

(5) ある条件を満足するまで、(2)~(5)を繰り返し行う。以上により構築したGAを用いた補償トルク算出コントローラのブロック線図をFig.2に示す。

## 4 実験

### 4.1 実験概要

1リンク移動マニピュレータを製作し実験を行い、提案したコントローラの有効性を検討した。移動マニピュレータが走行する路面形状を(1)式の形状のうちもっとも単純な形状として(5)式の左式としたので、コントローラ内に含まれる路面形状を(5)式の右式とした。

$$f(x) = \frac{0.2}{\pi} \cos(\pi x), \quad \hat{f}(x) = \hat{a}_1 \cos(\pi x) \quad (5)$$

また各リンクの目標値を(6)式のように与えた。

$$x_d = 0.5 \sin\left(\frac{2\pi}{16}t\right) + 1.0098(m), \theta_{1d} = 0 \text{ (rad)} \quad (6)$$

GAの各個体について、ビット数は6、個体数は5とし振幅 $\hat{a}_1$ が0.010~0.073まで取れるように設定し、突然変異率は各ビットに10%、淘汰数は4とした。

### 4.2 実験結果

コントローラ内の路面形状を $\hat{f}(x) = 0$ と仮定した時、水平路面および凹凸路面を走行した時の結果をFig.3に示す。Fig.3(a)より水平路面走行時には、完全に路面が推定されることを意味するのでリンク0はほぼ目標値に追従していることがわかる。それに対し凹凸路面走行時には未推定を意味し、駆動力 $f_t$ が足りず目標値に追従していないことがわかる。またFig.3(b)より、リンク1においてもリンク0と同様の傾向を示し、さらに定常偏差があることがわかる。これは静止摩擦の影響をキャンセルしきれていないためであると考えられる。

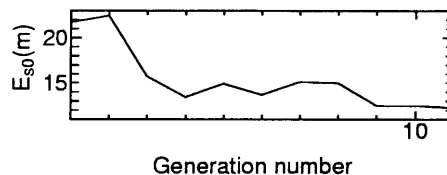
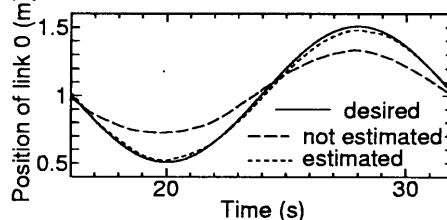
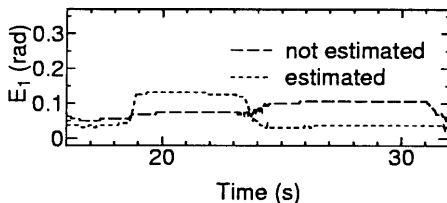


Fig. 4  $E_{s0}$  of the best individual for generation number



(a) Position response of link 0



(b) Error response  $E_1$  of link 1

Fig. 5 Effects of dynamic compensation

次に、提案したコントローラを用いた結果を示す。横軸に世代交代回数、縦軸に $E_{s0} = \int_{16(s)}^{32(s)} |E_0| dt (m)$ を取った結果をFig.4に示す。図より世代が進むにつれ $E_{s0}$ の値が減少していることがわかる。11世代目で $E_{s0}$ が最も小さくなり、この時の推定結果は $\hat{a}_1 = 0.057$ であった。これは真値とほぼ同じ値である。

さらに、推定された路面形状 $\hat{f}(x) = 0.057 \cos \pi x$ を用いたトルク補償の結果をFig.5に示す。また比較のために、前述の $\hat{f}(x) = 0$ を用いた時の追従性の悪い結果も同図に再度示す。Fig.5(a)より、推定された形状を用いることにより、リンク0はほぼ目標値に追従しており、水平路面走行時と同程度まで制御誤差を減少させることができ、動力学補償が行えていることがわかる。Fig.5(b)では、 $\hat{f}(x) = 0$ の時に比べても制御誤差の減少がほとんど見られない。このことよりも、制御誤差を生じさせているのは路面からの影響ではなく、静止摩擦等による他の要因であると考えられる。以上より、提案した手法の有効性を示した。

## 5 結言

本報では、凹凸路面を走行する移動マニピュレータに対し、GAを用いた補償トルク算出コントローラを提案し実機による評価を行った。その結果、路面形状が推定可能であり、また形状を用いて動力学補償を行うことにより追従誤差を減少させることができることを示した。

## 参考文献

- [1] 塚田・羽多野・大住・小原・高瀬, 凹凸路面を走行する移動マニピュレータの運動制御-路面形状の推定誤差と制御差の関係-, 第18回日本ロボット学会学術講演会, 493-494, (2000)
- [2] 安居院猛・長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1993