車輪形移動ロボットの振動制御*

西井久雄^{*1}, 柴谷一弘^{*2}, 鈴木健之^{*2}

Vibration Control of a Wheeled Mobile Robot

Hisao NISHII, Kazuhiro SHIBATANI and Kensi SUZUKI

This paper discusses an effective method for controlling vibration of a wheeled mobile robot. Due to its own elasticity, a wheeled mobile robot suffers from unfavorable vibration while travelling along its route, which causes undesirable positioning inaccuracies. We established a mathematical model of the 2-wheeled mobile robot. Based on this model, we designed a vibration control system using a disturbance observer in which the rotational elasticity of the 2-wheeled mobile robot is taken into account. The experimental results showed that the vibration control system proposed here is useful in practical applications.

Key Words: Wheeled Mobile Robot, Vibration Control, Resonance, Disturbance Observer

1. 緒 言

生産の効率化・省力化を目的とした工場の高度自動化の要望に伴い、移動ロボットに対する関心が高まっている。移動ロボットは、連続する誘導線等をセンサとする固定経路方式と、画像処理装置等をセンサとする自律誘導方式に大別できる。経路設置コストやレイアウト変更を考えると、自律誘導方式の方が汎用性があると思われる。一方移動ロボットに対する要求も高性能化されている。特に高速搬送や工場の省スペース化を実現するため、急旋回走行が要求されている。またステーションで移載装置との協調作業があり、停止位置の高精度化の要求がある。よって位置・方位ゲインを高くする必要があるが、高ゲインで高速急旋回走行を行うと、移動ロボットは振動を発生しやすくなり、特に半導体工場での振動は問題になっている。これを解決する方法の一つに軌道設計法がある。その代表的なものにスプライン曲線を用いた方法があり、基本的に加速度を連続的に制御する。

軌道設計法は受動的な制御方法であり、路面特性変

化等による不規則外乱や、移動ロボットの軽量化による無視できない弾性項の影響など、動的要因を補償することが難しい。そこで移動ロボットの動特性を考慮した能動的な制振制御方法が有効であると考えられる。

本報告は左右独立に駆動輪を有する自律移動ロボットの旋回方法の制振制御方法を提案する。まず移動ロボットの運動方程式を基にその数式モデルを作成する。次に作成したモデルから、旋回方向の振動の原因を考察し、制振制御の設計方法について説明する。最後に急旋回走行実験を行い、提案する制御方法の制振効果を示す。

2. 移動ロボットのモデリング

振動を抑制するには、その制御対象の動特性を把握する必要がある。これは制御対象の数式モデルを作成することを意味する。そこでラグランジュの運動方程式から⁽¹⁾、試作した移動ロボットのブロック図を求め、状態方程式を導き出す。

図1に試作した移動ロボットの概略図を示す。左右駆動輪は独立に制御可能であり、各駆動輪の速度差で旋回走行を行う。移載装置として台車部上に6リンクのマニピュレータを設置する。移動ロボットは駆動輪

* 原稿受付 平成3年8月12日。

^{*1} 正員, (株) 椿本チェーン 開発部 (〒617 長岡京市神足暮角1-1)。

^{*2} (株) 椿本チェーン 開発部。

N : 減速比 rad/rad

B : 左右車輪間隔 m

接点点はトルク源が存在しないから r_s は零である。よって式(6)を式(4), (5)に代入し, さらにモータの速度ループを付加することで移動ロボットのブロック線図2を得る。ここで,

K_v : 速度ゲイン V/V

K_t : トルク定数 kgm²s⁻²/A

K_e : 逆起電力定数 V/(rad/s)

K_f : 速度変換定数 V/(rad/s)

R_e : 電機子抵抗 Ω

u_{mr} : 右駆動輪モータ指令速度 V

u_{ml} : 左駆動輪モータ指令速度 V

である。

求めたブロック線図を状態方程式に変換すると式(7)を得る。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (7)$$

$$A_{11} = A_{22} = -\alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1^2 - \alpha_3^2)$$

$$A_{12} = A_{21} = \alpha_3 \alpha_2 / (\alpha_1^2 - \alpha_3^2)$$

$$A_{14} = -A_{24} = \alpha_4 / (\alpha_1 - \alpha_3)$$

$$A_{31} = -A_{32} = A_7 \{-A_{12} - A_{11} - D_z/J_z\}$$

$$A_{33} = -D_z/J_z$$

$$A_{34} = -2A_7 A_{14} - K_z/J_z$$

$$B_{11} = B_{22} = \alpha_1 \alpha_5 / (\alpha_1^2 - \alpha_3^2)$$

$$B_{12} = B_{21} = -\alpha_3 \alpha_5 / (\alpha_1^2 - \alpha_3^2)$$

$$B_{32} = -B_{31} = -A_7 (B_{11} - B_{12})$$

$$\alpha_1 = J_m + MA_6^2 + J_b A_7^2$$

$$\alpha_2 = K_t (K_e + K_v K_f) / R_a$$

$$\alpha_3 = MA_6^2 - J_b A_7^2$$

$$\alpha_4 = K_z A_7, \quad \alpha_5 = K_t K_v / R_a$$

ここで $\mathbf{x} = [\dot{\theta}_{mr} \quad \dot{\theta}_{ml} \quad \dot{\theta}_s \quad \theta_s]^T$, $\mathbf{u} = [u_{mr} \quad u_{ml}]^T$ である。 T は転置行列を意味する。

式(7)を用い右駆動輪モータの速度指令値から, 右駆動輪モータの角速度までの周波数特性と, 台車部旋回方向の角加速度までの周波数特性のシミュレーション結果を図3に示す。モータ角速度の周波数特性結果から, 34 rad/s付近に -8dB程度の反共振点が存在することがわかる。図4に移動ロボットの周波数特性の実測値を示す。図3, 4を比較すると波形が近似して

おり, 低次元化モデル式(7)は移動ロボットの特性をかなり正確に表現していると言える。

3. 提案する制振制御方法

2章で作成した移動ロボットのブロック線図2から移動ロボットは干渉系であり, 各駆動輪モータに反力が作用していることがわかる。図のループBは移動ロボットの前進加速度であり, それは左右駆動輪モータに同符号で反力として影響する。ループAは旋回加速度と弾性力の関数であり, 左右駆動輪モータに異符号で影響する。

左右駆動輪モータの反力の差(ループAの影響)は移動ロボットの旋回方向を乱す働きを行うことから, これが旋回方向の振動の原因であると考察できる。よって反力の差の情報をフィードバックすることで制振効果が期待できる。

式(1)~(3)から右駆動輪モータの反力 T_{mr} , 左駆動輪モータの反力 T_{ml} は, 式(8), (9)となる。

$$T_{mr} = (A_8 + A_9) \ddot{\theta}_{mr} + (A_8 - A_9) \ddot{\theta}_{ml} - A_{10} \theta_s \quad (8)$$

$$T_{ml} = (A_8 - A_9) \ddot{\theta}_{mr} + (A_8 + A_9) \ddot{\theta}_{ml} + A_{10} \theta_s \quad (9)$$

$$A_8 = MA_6^2, \quad A_9 = J_b A_7^2, \quad A_{10} = K_z A_7$$

左右駆動輪モータの反力の差 T_e は, 式(8)と式(9)の差から式(10)となる。

図3 移動ロボットの周波数特性(シミュレーション)

図4 移動ロボットの周波数特性(実測値)

$$T_e = T_{mr} - T_{ml} = 2A_9(\ddot{\theta}_{mr} - \ddot{\theta}_{ml}) - 2A_{10}\theta_s \quad \dots\dots\dots(10)$$

制振効果を得るために左右駆動輪モータの指令速度に式(11), (12)をフィードバックする。ここで G_p は力の単位を速度指令(電圧)の単位に変換する定数である。また K_n は制振ゲインとする。

$$F_{ml} = G_p K_n T_e \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$F_{mr} = -G_p K_n T_e \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$G_p = R_a / (K_t K_v) \quad \dots\dots\dots(13)$$

図2よりこのフィードバックループは駆動部の旋回方向角加速度を抑制する働きを持つ。またねじれ角度が発生すれば、駆動部の旋回角度を台車部の旋回角度に近づけ、ねじれ角度を小さくし弾性力の影響を抑制する働きを持つ。

ここで K_n の最適解について考察する。移動ロボットは制御対象が線形であるが、4・1節に示す誘導アルゴリズムは非線形である。よって誘導アルゴリズムを考慮せず、ブロック線図2に式(11), (12)をフィードバックしたシステムの根軌跡から K_n を決定する。その後誘導アルゴリズムを含めた走行実験を行い最適解を求める。

上記システムを等価変換するとブロック図5を得る。よって提案する制御方法はフィードバックとフィードフォワードの併用形と考えられる。旋回方向の特性改善を評価するため図5の u_{mr*} に正, u_{ml*} に負の入力を与え、台車の旋回角速度を出力とする根軌跡を求める。その結果を図6に示す。共役根 A, B と根 C の動きから、 K_n の最適値を0.25程度とする。なぜなら根 C は原点に高速で向かう働きを有し、 K_n をそれ以上にすると応答性が悪くなる。また共役根の実部も0.25を極小とし虚軸に近づく。図7に旋回方向のステップ応答をシミュレーションした結果を示す。図7から K_n は制振効果を得るが、0.5以上にすると応答性が悪くなることが判断できる。図6, 7から K_n は0.25程度が適当であると言える。

図5 提案する制振制御のブロック図

4. 実験

4・1 誘導アルゴリズム 時刻 t_i のベース座標における指定位置と方位を $P_{ti}(x_{ti}, y_{ti}, \theta_{ti})$, 現在位置と方位を $P_{ni}(x_{ni}, y_{ni}, \theta_{ni})$ とする。ここで τ はサンプル時間, i は時刻である。左右駆動輪モータの1サンプル時間当たりの回転角を $\Delta\theta_{mli}$, $\Delta\theta_{mri}$, 方位の変化を $\Delta\theta_{ni}$ とすると、式(14)~(16)から P_{ni} の近似解が計算できる⁽⁴⁾。近似解であるため累積誤差を発生するが、不連続に設置された磁石による絶対位置センサで補正する。

$$x_{ni} = -A_6(\Delta\theta_{mri} + \Delta\theta_{mli}) \sin(\theta_{ni-1} + 0.5\Delta\theta_{ni}) + x_{ni-1} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$y_{ni} = A_6(\Delta\theta_{mri} + \Delta\theta_{mli}) \cos(\theta_{ni-1} + 0.5\Delta\theta_{ni}) + y_{ni-1} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\theta_{ni} = A_7(\theta_{mri} - \theta_{mli}) + \theta_o \quad \dots\dots\dots(16)$$

ベース座標を基準とした移動ロボットの位置偏差ベクトル $Q(x_{ti} - x_{ni}, y_{ti} - y_{ni})$ と指令方位単位ベクトル $E(-\sin(\theta_{ti}), \cos(\theta_{ti}))$ の内積から、進行偏差を式(17)で与える。横偏差は Q と E の垂直ベクトルの内積から式(18)で与える。また方位偏差を式(19)で与える。

図6 根軌跡特性

図7 ステップ応答

$$e_{yi} = -(x_{ti} - x_{ni}) \sin(\theta_{ti}) + (y_{ti} - y_{ni}) \cos(\theta_{ti}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$e_{xi} = -(x_{ti} - x_{ni}) \cos(\theta_{ti}) - (y_{ti} - y_{ni}) \sin(\theta_{ti}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$e_{ci} = \theta_{ti} - \theta_{ni} \quad \dots\dots\dots (19)$$

K_v を進行方向ゲイン, K_x を横方向ゲイン, K_c を方位ゲインとして, 左右駆動輪モータの速度指令値(誘導アルゴリズム)を式(20), (21)で与える。右辺第3項は式(11), (12)で示した制振制御項である。

$$u_{mli} = K_y e_{yi} - K_c(K_x e_{xi} + e_{ci}) + F_{ml} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$u_{mri} = K_y e_{yi} + K_c(K_x e_{xi} + e_{ci}) + F_{mr} \quad \dots\dots\dots (21)$$

上記誘導アルゴリズムでは停止位置(ステーション)で横方向偏差と方位偏差が残留し平衡状態になる場合がある。よって実際には図8に示すように停止位置付近で K_x が連続的に零になるよう制御する。これにより停止位置での進行偏差と方位偏差が収束し移載装置の自由度を削減できる。

4.2 実験方法 実験に用いた走行パターンは, ベース座標の原点を始点とし, Y 軸方向に1m前進, 半径1mで90°左旋回(円弧走行), その後-X 軸方向に前進させた。加速時間は0.5 sec, 指令速度は0.4 m/secとした。また旋回方向の振動は移動ロボットの前端に加速度センサを取付け測定した。

T_e は式(10)より左右モータの角加速度差と旋回方向のねじれ角度の関数である。実験では式(10)を用いず外乱オブザーバを用い推定した。これは得たい情報が式(10)の左辺であり, $\ddot{\theta}_{mr} \cdot \ddot{\theta}_{ml} \cdot \theta_s$ を各々求める必要がないからである。モータの状態方程式を式(22)に示す。ここで T_m は反力(外乱力)とする。式(22)からコピナスのオブザーバ⁽³⁾を設計すると式(23), (24)を得る。ここで $\hat{A} \cdot \hat{K} \cdot \hat{E} \cdot \hat{I} \cdot \hat{H}$ はオブザーバ行列, ω はオブザーバの状態変数である。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_m \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_2}{J_m} & \frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\alpha_2}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\dot{\omega} = \hat{A}\omega + \hat{K}\theta_m + \hat{E}u \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} = \hat{I}\omega + \hat{H}\theta_m \quad \dots\dots\dots (24)$$

図8 K_x の可変構造特性

左右駆動輪モータに対し各々オブザーバを用い推定計算を行う。ここで各駆動輪モータの特性は等しいものとする。その結果オブザーバで得た左右駆動輪モータの反力の推定値を $\hat{T}_{ml}$, $\hat{T}_{mr}$ とすると, 反力の差の推定値は式(25)になる。よって得た $\hat{T}_e$ を式(11), (12)に代入し制振制御を行う。

$$\hat{T}_e = \hat{T}_{mr} - \hat{T}_{ml} \quad \dots\dots\dots (25)$$

4.3 従来制御法の問題点 まず式(20), (21)の右辺第3項が働かない状態(制振ゲイン K_n を零)で試作した移動ロボットを走行させた。図9に方位偏差特性, 図10に振動特性を示す。偏差を小さくするため方位ゲインを高くすると, 旋回走行開始時と終了時に3 Hz程度の振動が発生し, その減衰が遅いことがわかる。また図9から停止位置到着後スピントーン動作を行い, 方位偏差が収束していることがわかる。これは K_x が図8に示す可変構造機能を有するからである。

移動ロボットは偏差を抑制し走行する必要がある。これは実際の走行路付近は各種機器が配置されており, 接触事故を防ぐ必要があるからである。また停止位置で移動ロボットは移載装置との協調動作を行うため, 位置決め精度が要求されるからである。一方半導体ウエハなど振動を嫌うワークを搬送する要望があり, 振動を抑制して走行する必要がある。しかし図9, 10から従来制御法では振動と偏差の両方を抑制する

図9 方位偏差特性

図10 旋回方向振動特性

図 11 反力推定結果

図 12 制振制御を用いた旋回方向振動特性

ことが難しいと言える。これは従来方法が位置・方位の制御であり、振動問題に着目していないからである。

4.4 提案する制御方法の制振効果 K_n を零とした場合の反力推定結果 ($\hat{T}_{ml}$, $\hat{T}_{mr}$) と $\hat{T}_e$ を図 11 に示す。反力推定結果から良好にオブザーバが働いていることがわかる。また $\hat{T}_e$ と図 10 の振動特性を比較すると、その波形がよく一致しており、提案する制御方法は振動をフィードバックしていると言え、制振効果が期待できる⁽⁵⁾。制振ゲイン K_n を 3 章で得た最適値 0.25 に設定した場合の旋回方向振動特性を図 12 に示す。図 10 と比較すると著しい制振効果を確認できる。ここで図 12 の旋回走行開始時と終了時の振動のピークは、旋回するために必要な加速である。これは旋回と直線走行の切換え時の指令加速度の不連続点が原因であり、このピークが小さくなることは軌道誤差が発生していることを意味する。よって提案する制御方法は振動を抑制し、偏差に悪影響を与えていないことが言える。

4.5 方位偏差実験 3 章で得た K_n の最適値は

図 13 制振ゲインに対する方位偏差特性

誘導アルゴリズムを考慮せずに決定した。よって最適値を評価するため、 K_n を変えた方位偏差実験を行う。その結果を図 13 に示す。図より K_n を高くするとオーバーシュートが発生していることがわかる。しかし 0.5 以下であれば方位偏差が安定していることがわかる。 K_n が 0.25 付近では旋回走行時の偏差の変動を著しく抑制しており、試作した移動ロボットの実験最適値は 3 章の根軌跡特性で得た最適値とほぼ一致した。

5. 結 論

ラグランジュの運動方程式を用い、試作した移動ロボットの数式モデルを作成した。これは旋回方向の弾性項の存在を考慮している。またシミュレーション結果と実測結果からその妥当性を示している。次に数式モデルから、左右駆動輪の角加速度差と旋回方向のねじれ角度が振動の原因であると考察し、制振制御方法を提案した。これは各モータの反力の差をフィードバックする方法で、反力計算はオブザーバを用いているため新たなセンサを必要とせず実現している。さらに実験により提案する制御系の著しい制振効果を確認した。

文 献

- (1) 有本, ロボット力学と制御-III, システムと制御, 29-10(1985), 671-679.
- (2) 西井・鈴木・柴谷, 移動ロボットの防振制御, 第 3 回インテリジェント FA シンポジウム, (1991), 11-14.
- (3) 美多・小郷, システム制御理論入門, (1990), 124-130, 156-162, 実教出版.
- (4) 見浪・簾・上田・中野, 同次変換を用いた自律型移動ロボットの任意曲線コース誘導方法, 日本ロボット学会誌, 8-4(1990), 421-430.
- (5) 西井, 仮想ダンパを用いたロボットの防振制御, 機論, 57-536, C(1991), 90-95.