自走式小型ロボット位置計測制御システムの研究

(第1報)*

——自走式小型ロボットの構築——

鈴木基之** 山田陽滋** 土田縫夫*** 今井孝二***

A Study on Position Detection and Control System of Self-movable Micro Robot (1st Report)
—Construction of Self-movable Micro Robot—

Motoshi SUZUKI, Yoji YAMADA, Nuio TSUCHIDA and Koji IMAI

This paper deals with the construction and motion analysis of a new walking-type micro robot which is to be used in a self-movable micro robot system. The robot (16 mm long - 27 mm wide - 12 mm high) consists of a "body" holding a permanent magnet to be pulled by magnetic field and "legs (right and left)" with coils and electromagnets for walking. The motion principle of this robot is similar to a permanent magnet type linear motor. The motion speed and direction of the robot are regulated by controlling the frequency of driving currents supplied to each coils and electromagnets. Robot motions are theoretically formulated using a linear motion model. An experiment verified that real robot motions agree with the theoretical formulation, showing that the robot has high controllability.

Key words: mobile robot, micro robot, micro robot position control, micro linear motor

1. はじめに

多関節ロボットは、流れ生産ラインをはじめとした作業工程への適用を目的として研究開発が推進されている。一方、このタイプのロボットでは適用が困難である作業もいくつかある。まず第1に、精密機械の内部検査をはじめとした微細、狭所作業がある。このような分野では、現行の多関節ロボットでは作業環境に対して大きすぎるため導入が難しい。また、金型製作、各種プラントなどの配管検査、石油、ガスの備蓄タンク等の建築構造物検査をはじめとした対象ワークが非常に大きくかつ非常に重たい作業において現状のロボットを考えた場合、ロボットによる作業自身よりも対象ワークの搬送が問題となり導入が困難となる。本研究では、このように現状の多関節ロボットでは導入が困難である微細、狭所作業、プラントの配管検査、建築構造物検査、金型製作工程に導入が可能となる新たな小型ロボット位置制御システムを提案する。このようなロボットシステムは以下の条件を満たす必要がある。

- (1) ロボットは、作業環境において充分な制御性を有し小型であること。
- (2) ロボットシステムは、どのような作業環境にも容易に移動できるよう可搬性に優れていること。
- (3) ロボットは、作業環境において位置（軌跡）制御可能であること。

このような小型ロボットシステムは、本研究をはじめとして提案され、具体的な研究が始まったばかりである¹⁾²⁾。従って、本研究ではこの第1ステップとして上記3条件を満たす、小型ロボットを1台用いた位置計測制御システムを実際に構築する。システムの概要を図1に示す。

本論文では、作業環境を表1のように具体的に定義して、この環境に適した小型ロボットを構築し動作解析を行った。

2. 小型ロボットの構造

実際に製作した小型ロボットを図2に示す。

本体は、軽量化のためアルミニウム合金 (Al-Cu-Si 系) を用いている。本体には、小型で磁束密度の高い希土類コバルト磁石を2個内蔵している。磁石の寸法は1個あたり長さ5 mm×幅4 mm×高さ8 mmであり、磁束密度は約0.3 Tである。左右両足は、本体と同様に軽量化を考え、ポリウレタン樹脂を用いている。内蔵する巻線コイルは、 $\phi 0.1$ mmのポリウレタン皮膜導線を約400回巻いたものを使用している。そして、足には振動吸収用のウレタンダンパを介して対象ワーク表面へ吸着するための小型電磁石が固定されている。小型電磁石については、小型かつ少ない供給電流でも強い保持力を得るために、鉄芯形状を“コ”の字型として電磁石とワークピース表面で構成される磁路を閉じている。この鉄芯の回りに $\phi 0.1$

Fig. 1 Outline of the micro robot system

Table 1 Workpiece condition

Material	SPCC
Radius of workpiece surface	More than $R=1\ 000$ mm
Inclination angle	$0-90^\circ$
Surface roughness	$R_z=1\ \mu\text{m}$

* 原稿受付 平成5年4月26日

** 正会員 豊田工業大学工学部 (名古屋市天白区久方2-12-1)

*** 豊田工業大学工学部

Fig. 2 Structure of self-movable micro robot

Fig. 3 Photo of the micro robot

Fig. 4 Principle of the driving method

mm のポリウレタン皮膜導線を約 400 回巻いている。左右両足は、前後方向ストローク 2 mm の往復運動を可能とするようにリニアブッシュを介して、本体から延びたフランジにより固定されたガイドシャフトに取り付けられている。フランジは、軽量化および高剛性化を両立するために FRP の積層板 ($t=1.5$ mm) を使用している。リニアブッシュは、小型化、軽量化およびスライド抵抗の大幅低減を達成するため、一般に用いられるボールタイプのリニアブッシュやボールスプラインを使用せず、テフロンチューブを用いている。

図 2 が示すように、小型ロボットの寸法は長さ 16 mm×幅 27 mm×高さ 12 mm である。また、完成したロボットの重量は、11.4 g (制御用ケーブルを除く) である。

ロボットの写真を図 3 に示す。

3. 小型ロボットの動作原理

本研究における小型ロボットの駆動³⁾⁴⁾には、PM 型リニアモータの原理を用いる。本章では、このモータを用いたロボットの駆動原理について説明する。

図 4 に動作原理図を示す。図 4 に示すように、ロボットの本体には磁極が対になるよう永久磁石が 2 個内蔵されている。ロ

Fig. 5 Magnetic field around the robot

Fig. 6 Current timing chart (straight-going)

ット本体の左右両側には、実際にロボット本体を動かすための巻線コイルを内蔵した足が、前後方向に往復運動が可能な状態で取り付けられている。左右両足の外側には、ワークピース表面への保持力を発生させるための小型電磁石が固定されている。まず、片足の動きについて説明する。足に内蔵されている巻線コイルに電流を供給すると磁界が発生する。この磁界と本体内の 2 つの永久磁石の磁極の関係は図 4 のようになる。この時の磁力線の解析結果を、図 5 に示す。巻線コイルを内蔵する足には、図 5 から明らかなように本体内の S 極側から反発力、N 極側からは引張力が同時に働くため、この 2 つの力を加えた推進力が発生する。従って、足は図 4 に示すように本体を基準（支点）にして前方へ平行移動する。移動後、足の外側に固定されている小型電磁石に電流を流してワークピース表面に対する保持力を発生させ、足をワークピース表面に固定する。次に、小型電磁石による保持力が安定した後、巻線コイルに逆向きの電流を供給し先程と逆向きの磁界を発生させる。この時、足には本体を基準に先程と逆向き（後ろ向き）の推進力が働く。しかし、足は小型電磁石によりワークピース表面に固定されているため、相対的に足を基準（支点）にして本体が前進する。

このプロセスを繰り返す、つまり正逆交互の電流をパルス列として巻線コイルに供給しこれに合わせて小型電磁石を ON, OFF することにより、ロボットは前進し続ける。従って、もう一方の足に内蔵された巻線コイルおよび足に固定された小型電磁石にも図 6 に示すように、180° 位相が異なる電流を供給することにより足は左右交互に運動してロボットは直進“歩行”を行う（図 7）。

また、図 6 に示す供給パルス電流の周波数を制御することにより、ロボットの直進移動速度（歩行スピード）を変更することが可能となる。

ロボットの進行方向を変更するには、右旋回の際は、図 8 に示すように右足への供給電流のパルスの割合（パルスレート）

Fig. 7 Moving flow of the robot

Fig. 8 Current timing chart (right turn)

Fig. 9 Forces acting on the robot when climbing

を左足より下げるように制御して、駆動周波数を下げることにより可能となる。この右足のパルスレートを下げるほど、右旋回速度も増加する。

左旋回の場合、これとは逆に左足への供給電流のパルスレートを下げるよう制御して駆動周波数を下げる。

以上のPM型リアモータ方式による走行原理より、本研究で用いる自走式小型ロボットは人間の移動と同様の“2本足による歩行ロボット”であるといえる。

4. 小型ロボットの動作解析

本章では、小型ロボットの位置制御に必要とされる定常状態での動作モデル解析を行う。

4.1 ロボットの駆動条件

本研究では、90°の垂直面までの登坂を対象としているため、ロボットの軽量化を推進し、さらに足に吸着用の小型電磁石を取り付けた。本節では、このように製作されたロボットがどのような条件において0~90°までのワークピース表面に登坂可能となるかを解析し、小型電磁石の保持力を決定する。

ロボットが傾斜面を登っている状態で働く傾斜面方向の力を図9に、また、使用する記号を以下に示す。

- M_B : ロボット本体の重量 (kg)
- M_L : 足の重量 (小型電磁石を含む) (kg)
- F_{MB} : ロボット本体の永久磁石による保持力 (N)
- F_{ML} : 小型電磁石による保持力 (N)
- f_d : ロボット本体の摩擦力 (駆動抵抗) (N)
- f_s : 足 (小型電磁石) の摩擦力 (N)
- f_t : 推進力 (N)
- θ : 傾斜角度 (°)

Fig. 10 Relation between inclination angle and required magnetic holding force

μ_d : ロボット本体底面とワークピース表面との静摩擦係数

μ_s : 足 (小型電磁石) とワークピース表面との静摩擦係数

図9の状態において、足に内蔵されている巻線コイルに電流を供給することにより発生する推進力 f_t ($I=0.4$ A の時 $f_t=1$ N) は本体の摩擦力 f_d および足の摩擦力 f_s より1けた大きく、以下の2つの条件を同時に満たしている。

$$f_t > f_d \quad (1)$$

$$f_t > f_s \quad (2)$$

この時、図9より明らかなように本体と足に働く f_t は互いに大きさは等しく方向が反対であるため、ロボット全体で考えた時打ち消し合う。従って、傾斜面でのロボットの登坂可能条件は、以下の式で表される。

$$f_s > f_d \quad (3)$$

ここで、足の摩擦力 f_s は次の式で表される。

$$f_s = \mu_s (F_{ML} + M_L g \cdot \cos \theta) - M_L g \cdot \sin \theta \quad (4)$$

同様に、本体の摩擦力 f_d は次の式で表される。

$$f_d = \mu_d (F_{MB} + M_B g \cdot \cos \theta) + M_B g \cdot \sin \theta \quad (5)$$

式(4)および式(5)を式(3)へ代入すると、ロボットの登坂可能条件を示す次の式を得る。

$$\begin{aligned} & \mu_s (F_{ML} + M_L g \cdot \cos \theta) - M_L g \cdot \sin \theta > \\ & \mu_d (F_{MB} + M_B g \cdot \cos \theta) + M_B g \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

この式を小型電磁石の保持力 F_{ML} について解くと以下の式となる。

$$F_{ML} > \frac{\mu_d}{\mu_s} F_{MB} + \left(\frac{\mu_d}{\mu_s} M_B - M_L \right) g \cdot \cos \theta + \frac{(M_B + M_L) g}{\mu_s} \sin \theta \quad (7)$$

ここで、別途、実験を行い得られた式(7)に含まれる各パラメータの具体的な数値を以下に示す。

$$M_B = 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$M_L = 7.0 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$F_{MB} = 0.20 \text{ N}$$

$$\mu_d = 0.17$$

$$\mu_s = 0.10$$

パラメータの具体的な数値を式(7)に代入して登坂可能条件を表す具体的な式が得られる。

$$F_{ML} > 0.34 + 0.17 \cos \theta + 1.1 \sin \theta \quad (8)$$

式(8)を計算して得られたグラフを図10に示す。図10より明らかなように、傾斜角度0~90°まで登坂可能とする理論的条件は $F_{ML} > 1.45$ N である。

しかし、実際には過大電流を供給した時、以下の問題が発生する。従って、最適値を見つけ出す必要がある。

Fig. 11 Motion model of the robot in turning

- (1) 小型電磁石に大電流を流した場合、巻線抵抗により発熱し表面積が少ないため放熱できず温度が上昇し続け最終的に断線してしまう。
- (2) 大電流を流して F_{ML} が増加した場合、ヨー抵抗が増加してしまい旋回が困難となってしまう。従って、接触部にある程度のすべりが発生するように電流を制限する必要がある。

最適値を求めるために、実際に小型電磁石の発熱テスト、ロボットの旋回テストを行った。この結果を基に最適値として $F_{ML}=2.4\text{ N}$ ($I=0.4\text{ A}$) を用いる。

4.2 ロボットの動作モデル

本研究では、最終的に小型ロボットの位置制御を行うが、この制御を行うためにはロボットの動作を表す数学的モデルが必要となる。ロボットが旋回運動している時の状態モデルを、図11に示す。また、図11で用いる記号を以下に示す。

- V_v : ロボットの移動速度 (mm/s)
- V_r : 右足の実効移動速度 (mm/s)
- V_l : 左足の実効移動速度 (mm/s)
- ω : ロボットの旋回速度 (rad/s)
- T_d : 左右両足の中心間距離 (mm)
- s_0 : 水平面でのすべり率

なお、ロボットは歩行型であるため移動の際横揺れを伴うが、ここでは本体の中心点の移動について扱う。

図11に示すようにモデル化した時、ロボットの動作について以下の式が得られる⁵⁾。

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_d/2 \\ 1 & -T_d/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)において、両足の実効移動速度 V_r, V_l はロボットの足の行程 (=4 mm) および足へ供給される電流の駆動周波数 f (Hz) を用いて次の式で表される。

$$V_r, V_l = 4 \cdot f \cdot (1 - s_0) \quad (\text{mm/s}) \quad (10)$$

ここで、 s_0 (すべり率) は理想移動速度 (=4f) に対するすべりによる速度損失の割合を示す。

従って、本研究で用いる自走式小型ロボットの動作は、理論的には式(9)および式(10)により表される。

4.2.1 直進移動速度検定

式(9)を移動速度 V_v について解くと以下の式が得られる。

$$V_v = \frac{V_r + V_l}{2} \quad (11)$$

式(11)に $V_r = V_l$ および式(10)を代入することにより駆動周波数と直進移動速度の関係は以下の式で表される。

$$V_v = 4 \cdot f \cdot (1 - s_0) \quad (\text{mm/s}) \quad (12)$$

図12に、小型ロボットの駆動実験で得られた駆動周波数と直進移動速度の関係および式(12)を示す。図12から明らかな

Fig. 12 Relationship between driving frequency and moving speed

Fig. 13 Relationship between driving frequency and rotational speed (left turn)

ように、すべり率 $s_0=0.375$ の時、式(12)と実験結果は一致する。よって、実際に小型ロボットの位置制御を行う際、式(12)を用いることによりロボットの直進移動速度と駆動周波数の関係を求めることが可能となる。

4.2.2 旋回速度検定

式(9)を旋回速度 ω について解くと以下の式が得られる。

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{T_d} \quad (\text{rad/s}) \quad (13)$$

ここで、ロボットのトレッド $T_d=24\text{ mm}$ を代入して次の式が得られる。

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{24} \times \frac{180}{\pi} \quad (^\circ/\text{s}) \quad (14)$$

ここで、例として左旋回を考え、旋回時における左右両足の移動速度の関係を以下のように設定する。

$$V_l = \frac{1}{2} V_r \quad (15)$$

式(15)、 $s_0=0.375$ および式(10)を式(14)へ代入することにより駆動周波数とロボットの旋回速度の関係は以下の式で表される。

$$\omega = \frac{0.625}{12} f \times \frac{180}{\pi} \quad (^\circ/\text{s}) \quad (16)$$

右旋回の時も同様に式(16)で表される。図13に小型ロボットの駆動実験で得られた駆動周波数と左旋回速度の関係および式(16)を示す。図14に駆動周波数と右旋回速度の関係および式(16)を示す。図13および図14から明らかなように、すべり

Fig. 14 Relationship between driving frequency and rotational speed (right turn)

率 $s_0=0.375$ の時、式 (16) と実験結果は誤差の範囲内でほぼ一致する。従って、実際に小型ロボットの位置制御を行う際、式 (16) を用いることによりロボットの旋回速度と駆動周波数の関係を求めることが可能となる。なお、厳密に実験結果と式 (16) を比べた時、低駆動周波数領域では実際の旋回速度の方が式 (16) で得られる値より小さくなっている。これは、以下の理由による⁶⁾。式 (16) の基になる式 (9) は、足とワークピース表面と足の接触部に生じる旋回抵抗力が非常に微小な時に成立する。しかし、低周波数で駆動する時には駆動力が離散的に伝達するため、旋回抵抗力として最大静止摩擦力が働く。従って、旋回抵抗力により実際の旋回速度は理論値より低下する。駆動周波数が高い領域では、ロボットの慣性重量のため連続的な動きとなり旋回抵抗力は動摩擦力となり減少するため、旋回速度は理論値に近づく。

以上から明らかなように、本研究で用いる自走式小型ロボットの位置制御を行う際には、その動作は式 (9) および式 (10) により計算することができる。

5. ま と め

本研究では、新たな小型ロボットシステムを提案し、このシ

ステムに適した自走式小型ロボットを構築した。この小型ロボットについて行った項目を以下に示す。

- (1) 自走式小型ロボットとして、駆動源をPM型リニアモータ方式とした新たな歩行型ロボットを提案した。また、水平面から90°の垂直面での駆動を可能とするため、ロボットの“足”には小型電磁石を設けた。
- (2) 軽量化、小型化に重点をおき、実際に製作したロボットの寸法は、長さ16 mm×幅27 mm×高さ12 mm、重量は11.4 gである。
- (3) 製作したロボットの定常状態における数学的動作モデルを提案した。
- (4) ロボットを用いた実際の動作検定テストにより、この動作モデルの確認、補正を行った。
- (5) ロボットの位置制御におけるコマンドと動作に関する関係式には、この数学的動作モデルを用いることが可能となった。

今後は、この自走式小型ロボットの位置計測方式、位置制御方式の研究を推進し、新たな小型ロボット位置制御システムの構築を行う。将来的には、この小型ロボットシステムを複数用いた協調制御型小型ロボット群を提案する。

最後に、本研究の磁場解析に協力してくれた伊藤良雄君（現修士2年）に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 青山尚之, 金子正和, 岩崎隆之, 佐々木 彰, 深谷次助, 下河辺明: 小型自走機械群による超精密生産機械システム (第2報), 1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 897.
- 2) 鈴木基之, 山田陽滋, 土田縫夫, 今井孝二: 自走式小型ロボットの位置計測制御に関する研究, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集 No. 1, (1992) 83.
- 3) 樋口俊郎ほか編: マイクロメカニカルシステム実用化技術総覧, フジテクノシステム, (1992).
- 4) W. Trimer: Actuator for Micro Robots, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom., vol. 3, (1989) 1547.
- 5) 上田暁彦, 油田信一: 内外界センサのデータ融合に基づく車輪型移動ロボットのポジショニング, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集 No. 1, (1992) 85.
- 6) F. P. Bowden and D. Tabor: The Friction and Lubrication of Solids, Oxford University Press, New York, N. Y., (1986).