全方向移動床磨きロボットへの非干渉PID制御の適用

布施 嘉裕* 丹沢 勉* 清弘 智昭*

The Non-Interference PID Control for Twin Brushes Polishing Robot

Yoshihiro Fuse*, Tsutomu Tanzawa* and Noriaki Kiyohiro*

A conventional floor polishing mobile vehicle or robot that has a rotary brush should be fairly large in body size and heavy in weight to prevent unnecessary movement caused by friction between a rotating brush and a floor. When those robots having larger weight are used to sweep or polish a floor, accidental collisions may damage office fixtures in a room. From this point of view, a light weight polishing robot is preferable. To satisfy this demand, the floor polishing robot using a rotary brush polisher was developed. But it has danger to roll up an obstacle. This paper shows a new control scheme for the floor polishing robot, which has two rotary brush polishers. This omnidirectional mobile robot requires no driving for locomotion and steering because frictions between a floor and rotating brushes is used as the driving force. We examined for a theory to control this robot by non-interference PID control, and clarified the effectiveness by experiments.

Key Words: Floor Polishing Robot, PID Control

1. はじめに

オフィスビル、デパート、ホテル、公園など、清掃作業を必要とする環境は多く、清掃の種類も多様である。これらの作業は人間のいない夜間や休日に行われることが多く、さらに作業は単調かつ重労働で、しかも汚れやすいなど、代表的な3K職場の一つである。

清掃に携わる人の平均年齢は60歳以上になるところもあり、特に若い労働力は著しく不足している。床面清掃など、1ヶ月に1回程度の定期的に行われる作業は、1チーム3~5名で行われている。このような作業は肉体労働であり、数少ない若い労働力がこれを担当することになるため、ロボットを導入することにより、1チームの構成を1人でも減らすとともに、作業者の労働負担を軽減させたいところである。

そのため清掃ロボットの開発が望まれるようになり、人間が操作することなく自律的に床面を清掃するロボットが開発され、実際に清掃現場において使用される例も増加している[1]~[3]。しかし、このようなロボットは人がいない夜間に広い範囲を清掃することが目的であり、長時間自動的に走行させる必要性から、バッテリーや洗剤等を搭載しているため、大型となっている。そのため、廊下や部屋等の狭い範囲を清掃することを目的とし、持ち運びが容易な床磨きロボットが求められている。

この要求を満たすために、小型・軽量の自己推進床磨きロボットが開発された[4][5]。ポリッシャを熟練者が操作する場合には、ブラシと床面との摩擦による反力を腕力で抑え込まずに、ブラシの接触面を常に変化させることにより、ブラシ位置の保持や移動を行っている。開発されたロボットはこの原理を用い、移動のための駆動装置を有さずに任意の方向へ推進力を発生させることを可能にした。しかしながら、このロボットはその構造から、ロボットの姿勢を任意の姿勢角度を保持したまま全方向へ移動することは不可能であり、Fig. 1のように障害物が多い場所や狭く入り組んだ場所の清掃は困難である。

そこで、任意の姿勢を保ったまま任意の方向に移動でき、ポリッシャが入れる場所なら清掃が可能な2個のポリッシャを有するツインポリッシャロボットが開発された[6][7]。ここでは、本ロボットを非干渉PID制御により制御するための理論的な検討を行い、実験によりその有効性を明らかにした。

Fig. 1 Locus limited of single polishing robot

原稿受付 2008年6月7日

*山梨大学

*University of Yamanashi

■ 本論文は提案性で評価されました。

Fig. 2 Manually operated floor polisher

2. 回転ブラシ型ポリッシャの移動原理

ここで用いた回転ブラシ型ポリッシャの構造を Fig. 2 に示す。回転ブラシは床面に対して反時計回りに回転する。このときブラシと床面の間に回転摩擦による力が発生する。この力はブラシの回転面と床面が一樣に接している場合には、回転中心に対して対称な点で発生する摩擦力と互いに打ち消しあう。操作棒を用いてポリッシャを傾けると摩擦力が偏って発生するため、ほかより摩擦力が勝る方向にポリッシャは移動する。すなわち、操作棒を上下させることにより前後方向に、ひねると左右方向に移動することができる。例えば、操作棒を上を持ち上げると、ブラシ前側に摩擦力が偏り、ブラシは反時計回りに回転しているため、反力である右側にブラシは動く。

以前開発されたシングルポリッシャロボットや本ロボットは、この原理を応用している。また、推進力に関する理論および実験により、推進力は ± 3 [deg] の範囲内でブラシを傾ける角度に比例していることが分かっている [5]。

3. ロボットの構造

ロボットの構造を Fig. 3 に示す。本ロボットは、2 個の回転ブラシと 4 個のサーボ、3 個の光学式ロータリエンコーダを使用した自己位置・方向推定器から構成される。回転ブラシはジンバル機構により X , Y の 2 自由度を持ち、それぞれサーボによりブラシを任意の方向に傾けることができる。

2 個のブラシはそれぞれ逆方向に一定速度で回転している。ブラシが水平の場合には床とブラシの間の摩擦力がブラシ全面で均等に発生するため推進力は発生しない。ブラシを傾けると、傾けた側の反力が増加するので、ある一定方向に推進力が発生する。本ロボットは、Fig. 4 に示すように、ブラシを Fig. 3 の X 軸方向に対して同じ向きに傾けると旋回し、反対の向きに傾けると Y 軸方向に直進する。また、 Y 軸方向に対して反対の向きに傾けると X 軸方向に直進する。この推進力はロボットの移動が可能な大きさのため、駆動輪等の他の動力が不要となった。

4. 清掃経路と必要となる精度

廊下や部屋などの実環境を本ロボットが清掃する場合、壁から壁への往復を繰り返しながら少しずつ前進し、清掃領域を塗りつぶしていく経路が効率的であると考えられる。また、往復の際にブラシが磨く領域をその半径程度重ねればロボットが多

Fig. 3 Structure of twin brushes polishing robot

Fig. 4 Relationship inclination of brushes and direction of thrust

Fig. 5 Traveling strategy of the robot

少軌道からずれても磨き残しが生じることがない。これらの理由からロボットの経路を Fig. 5 のように決定した。本ロボットは、床を磨く作業を行うことから、汚れがひどい箇所は時間をかけて磨き、また、清掃範囲を満遍なく磨くといったことが必要となる。清掃経路としては、前者は速度制御、後者は位置制御が必要であることを示している。ロボットの構造から Fig. 5 のように、 X 方向は速度一定、 Y 方向は位置一定でロボットを

Fig. 6 Transformation of coordinates

移動させ、Y 方向については、壁から壁への往復の際にはブラシで磨いた部分をブラシの半径約 150 [mm] ほど磨く領域を重ねる必要がある。そのため、目標直線からのずれが 75 [mm] 以下であれば磨き残しのない移動を行うことが可能である。

5. 座標変換と制御系の非干渉化

5.1 座標変換

Fig. 5 の清掃経路は部屋に対する座標系、すなわちグローバル座標系である。一方、ロボットは自分の現在の座標や方向、すなわちロボットのローカル座標系で推進力の発生、移動などを行う。グローバル座標系に対して位置と速度の制御を行うため、与えられたグローバル座標系での偏差をロボット座標系（ローカル座標系）の目標値に変換してロボットの制御を行う。ローカル座標系での制御結果を再びグローバル座標系に変換することによりグローバル座標系における制御結果が得られる。これをフィードバックすることによりグローバル座標系での位置と速度の制御が可能となる。Fig. 6 にグローバル座標系 X, Y とローカル座標系 x, y の関係を示す。

ただし、 f_x, f_y はローカル座標系での力、 F_X, F_Y はグローバル座標系での力、 θ はローカル座標系とグローバル座標系との角度である。式 (1), (2) にグローバル座標系をローカル座標系に変換する式を示す。

$$f_x = F_X \cos \theta - F_Y \sin \theta \quad (1)$$

$$f_y = F_X \sin \theta + F_Y \cos \theta \quad (2)$$

また、 v_x, v_y をローカル座標系でのロボットの速度、 V_X, V_Y をグローバル座標系でのロボットの速度とすると、

$$V_X = v_x \cos \theta + v_y \sin \theta \quad (3)$$

$$V_Y = -v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \quad (4)$$

となる。

5.2 制御系

Fig. 7 に制御系のブロック図を示す。 ref_V_X は X 方向の速度の目標値、 ref_Y は Y 方向の位置の目標値である。目標値と制御系の出力との差である偏差が制御器 $G_{C1}(s), G_{C2}(s)$ の入力となる。制御器の出力 F_X と F_Y は式 (1), (2) により f_x, f_y に変換される。 f_x, f_y は x, y 方向の伝達関数が $G_1(s), G_2(s)$ のロボットの入力となり、ローカル座標系の出

Fig. 7 Block diagram of interference control

Fig. 8 Block diagram of non-interference control

力 v_x, v_y が出力される。これは、式 (3), (4) によりグローバル座標系へと変換される。

Fig. 7 のブロック図は、 X と Y の間で相互干渉が起きている。

$$\begin{aligned} V_X &= E_X G_{C1} (G_1 \cos^2 \theta + G_2 \sin^2 \theta) \\ &\quad + E_Y G_{C2} (-G_1 \sin \theta \cos \theta + G_2 \cos \theta \sin \theta) \quad (5) \\ Y &= \frac{1}{s} \left\{ E_Y G_{C2} (G_1 \sin^2 \theta + G_2 \cos^2 \theta) \right. \\ &\quad \left. + E_X G_{C1} (-G_1 \sin \theta \cos \theta + G_2 \cos \theta \sin \theta) \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

5.3 非干渉化

式 (5), (6) において、非干渉にするには、干渉部分が 0 になるようにすればよい。

$$-G_1 \sin \theta \cos \theta + G_2 \cos \theta \sin \theta = 0 \quad (7)$$

これから、非干渉になる条件は、

$$\sin \theta \cos \theta (G_2 - G_1) = 0 \quad (8)$$

となるが、 θ は任意の値が求められるため、非干渉の条件は、

$$G_2 = G_1 \quad (9)$$

である。しかし、この条件を満たすのは難しい。このため、ブロック図において、干渉する部分を打ち消す要素 ($\frac{G_1}{G_2}, \frac{G_2}{G_1}$) を制御部で計算すればよい。Fig. 8 に非干渉制御系にした際のブロック図を示す。

5.4 システム同定

G_1, G_2 について、無駄時間と一次遅れからなると仮定し、ステップ応答を求めた。その結果を Fig. 9 に示す。これより、

$$G_1(s) = \frac{534}{1 + 2.0s} e^{-0.3s} \quad (10)$$

Fig. 9 Step response for G_1 , G_2 identification

$$G_2(s) = \frac{712}{1 + 1.7s} e^{-0.3s} \quad (11)$$

$$\frac{G_1(s)}{G_2(s)} = \frac{534}{712} \frac{1 + 1.7s}{1 + 2.0s} = \frac{534}{712} \left(1 + \frac{-\frac{3}{20}s}{s + \frac{1}{2}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{G_2(s)}{G_1(s)} = \frac{712}{534} \frac{1 + 2.0s}{1 + 1.7s} = \frac{712}{534} \left(1 + \frac{\frac{3}{17}s}{s + \frac{10}{17}} \right) \quad (13)$$

となった。

5.5 伝達関数の離散化

求めた式 (12), (13) をソフトウェア上で実現するため, 離散化した式に変換したものを用いた. その計算結果を式 (14) ~ (17) にそれぞれ示す.

$$\frac{G_2}{G_1} : y(k) = \frac{133}{100} (u(k) + c(k)) \quad (14)$$

$$c(k) = \left(1 - \frac{10}{17}T \right) c(k-1) + \frac{3}{17} (u(k-1) - u(k-2)) \quad (15)$$

$$\frac{G_1}{G_2} : y(k) = \frac{100}{133} (u(k) + c(k)) \quad (16)$$

$$c(k) = \left(1 - \frac{1}{2}T \right) c(k-1) - \frac{3}{20} (u(k-1) - u(k-2)) \quad (17)$$

6. PID 制御の実現

6.1 PID 制御の調整則

本ロボットでは X 方向の速度制御, Y 方向の位置制御, 姿勢角 θ の制御を同時に行う必要がある. ここでは, 速度制御に Ziegler and Nichols のステップ応答法を, 位置制御に限界感度法をそれぞれ用いた.

6.2 X 方向の速度制御

Fig. 10 にロボットの X 方向の速度に関するステップ応答を示す. これより, 等価むだ時間 $L = 1,604$, 最大勾配の変化率 $R = 0.3$ となり, PID パラメータは,

$$K_P = \frac{1.2}{RL} = 0.002494 \quad (18)$$

$$T_I = 2L = 0.6 \quad (19)$$

$$T_D = 0.5L = 0.15 \quad (20)$$

となった。

Fig. 10 Step response of X velocity for PID parameters Fig. 11 Y locus and rotated angle θ for PID parameters

Table 1 Gains and periods

	K_0	T_0 [s]
Y	0.00293	5.33
θ	0.01242	2.5

Table 2 PID parameters

	K_P	T_I	T_D
Y	0.001757	2.665	0.66625
θ	0.00745	1.25	0.3125

6.3 位置制御

Fig. 11 にロボットの Y 方向, θ 方向の位置に関する持続振動を示す.

これから, 各方向のゲイン K_0 , 周期 T_0 は Table 1 となり, この結果, PID パラメータは Table 2 となった.

6.4 PID 調節器の離散化

アナログ系の PID 調節器をコンピュータ上で実現するために離散化を行う必要がある. 今回は速度型アルゴリズムを適用した. なお, 制御のサンプリング時間は, CPU の演算時間を考慮して 20 [ms] とした.

7. 走行実験

7.1 実験条件

床面については, P タイルが敷き詰められた床面を使用し, 床面は乾いた状態で実験を行った. また, 通常ポリッシャによる清掃にはブラシ, パッド, モップを用いるが, 今回はブラシを用いた.

7.2 静止状態

静止状態を保持した場合の X 方向の速度, Y 方向の位置, 回転角度の結果を Fig. 12 に示す. なお, 姿勢角 θ については独立した制御を行っている.

X 方向, Y 方向ともに ± 5 [mm] 程度で静止しており, 姿勢

Fig. 12 Step response of stationary state at 90 [deg]

角も ± 2 [deg] 程度の変動で制御されている。振動が発生しているが、経時による定常的なブラシの変形等により摩擦が偏るため、回転数に同期して発生しているものと思われる。ロボットが停止状態となるのは運動の切り替え時であり、その目的は車体を安定させることにある。この実験結果は、その目的を十分に果たしている。

7.3 等速移動

7.3.1 90 [deg] 姿勢保持

進行方向に 90 [deg] の姿勢を保持したまま X 方向へ等速移動（目標速度 200 [mm/s]）したときの、 X 方向の速度、 Y 方向の位置、回転角度の結果を Fig. 13 に示す。なお、本ロボットは床を清掃するという性質上から、高速移動させる必要はないため、目標速度である 200 [mm/s] は十分な速度であると考えられる。以後の実験に関しても同条件で行った。

速度について約 2 [s] で収束し、収束後の最大偏差は約 40 [mm/s] であった。また、位置については最大偏差約 30 [mm] となり、姿勢角については最大偏差約 5 [deg] であった。

7.3.2 180 [deg] 姿勢保持

進行方向に 180 [deg] の姿勢を保持したまま X 方向へ等速移動（目標速度 200 [mm/s]）したときの、 X 方向の速度、 Y 方向の位置、回転角度の結果を Fig. 14 に示す。

速度については約 4 [s] で収束し、収束後の最大偏差は約 20 [mm/s] であった。また、位置については最大偏差約 40 [mm] となり、姿勢角については最大偏差約 4 [deg] となった。

7.3.3 135 [deg] 姿勢保持

進行方向に 135 [deg] の姿勢を保持したまま X 方向へ等速移動（目標速度 200 [mm/s]）したときの、 X 方向の速度、 Y 方向の位置、回転角度の結果を Fig. 15 に示す。

速度については約 2 [s] で収束し、収束後の最大偏差は約 50 [mm/s] であった。また、位置については最大偏差約 30 [mm] となり、姿勢角については最大偏差約 5 [deg] となった。

Fig. 13 Step response of constant velocity at 90 [deg]

Fig. 14 Step response of constant velocity at 180 [deg]

7.4 非干渉化の有効性

Fig. 7 を実装し、非干渉化の有効性を検証した。Fig. 14 (a) のように、進行方向に 180 [deg] の姿勢を保持したまま X 方向へ等速移動（目標速度 200 [mm/s]）したときの、 X 方向の速度、 Y 方向の位置、回転角度の結果を Fig. 16 に示す。

Fig. 14 (b) と Fig. 16 (b) を比較すると、Fig. 16 (b) は X 方向の速度の最大偏差が 100 [mm/s] 以上であったのに対し、Fig. 14 (b) では 50 [mm/s] 以下となった。干渉系の場合、 X 方向の速度や Y 方向の位置の誤差が互いの制御に影響を及ぼしていると考えられる。

7.5 効率的な清掃経路に基づいたロボットの移動

非干渉 PID 制御を適用し、Fig. 5 のようにロボットを往復移動させた。 X 方向に 1,000 [mm] 等速移動（目標速度 200 [mm/s]）

Fig. 15 Step response of constant velocity at 135 [deg]

Fig. 16 Interference control

させた後静止させ、その状態のまま Y 方向へ 300 [mm] 移動させ、一度静止後、X 方向へ -1,000 [mm] 等速移動させたときのロボットの軌跡を Fig. 17 に示す。

Fig. 5 のようにロボットを動作させたとき、往路と復路で磨き残しのないように移動させる必要がある。Fig. 17 から、X 方

Fig. 17 Locus of robot

向への往復移動時に目標直線からのずれが 75 [mm] 以下となっているため、磨き残しのない移動が行えている。

8. おわりに

本研究では、床磨きロボットの全方向移動を目的としてロボットの開発を行った。また、ロボットの制御法として、位置と速度を独立に制御できる非干渉型 PID 制御を行った。ロボットを制御した結果から、停止や等速度移動について安定した制御が可能であることを示し、実際の清掃作業に必要な動作を本ロボットにより実現できることを示した。

参考文献

- [1] 山本, 金沢, 上地: “清掃ロボット (スイーパー) の開発”, 第 2 回ロボットシンポジウム予稿集, pp.199-204, 1992.
- [2] C. Hofner and G. Schmidt: “Path planning and guidance techniques for an autonomous mobilecleaning robot,” Proc. IROS'94, pp.610-617, 1994.
- [3] 青山元, 田島茂樹, 横田和隆, 尾崎功一, 山本純雄: “自律走行式床面清掃ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.57-64, 1998.
- [4] H. Furiya, N. Kiyohiro and T. Tanzawa: “Floor Polishing Robot Driven by Self Propulsive Force,” Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, pp.208-213, 1993.
- [5] 降矢裕, 清弘智昭: “床磨きロボットの自己推進制御”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.854-859, 1995.
- [6] H. Furiya, N. Kiyohiro and T. Tanzawa: “The Motion Control for Twin Brushes Polishing Robot,” Proc. of 3rd IASTED International Conference of Control and Application, pp.222-227, 1995.
- [7] 長江信明, 清弘智昭, 降矢裕: “ツインポリッシャ床磨きロボットの走行制御”, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.279-280, 1997.

布施嘉裕 (Yoshihiro Fuse)

2003 年山梨大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修了。同年山梨県入庁, 2006 年より山梨県富士工業技術センター勤務。2007 年より山梨大学大学院医学工学総合教育部 (3 年博士課程) 人間環境医学専攻生命情報システム学コースに在籍。

(日本ロボット学会学生会員)

清弘智昭 (Noriaki Kiyohiro)

2000 年より山梨大学大学院医学工学総合研究部医学・工学融合学域 生体環境医学系教授。工学博士。計測, 制御, 情報通信, 電子デバイス, 機器工学の研究に従事。印刷学会, 電気学会などの会員。

丹沢 勉 (Tsutomu Tanzawa)

1997 年山梨大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。同年より富士重工業 (株) 入社。2007 年より山梨大学大学院医学工学総合研究部工学学域・情報システム工学系助教。計測, 制御などの研究開発に従事。
(日本ロボット学会正会員)