床面清掃ロボットのための吸引装置の開発*

青山 元^{*1}, 小森谷 徹^{*2}, 田島 茂樹^{*3}
尾崎 功一^{*4}, 横田 和隆^{*4}, 山本 純雄^{*4}

Development of Suction Mechanism for Floor Cleaning Robot

Hajime AOYAMA, Toru KOMORIYA, Shigeki TAJIMA,
Koichi OZAKI, Kazutaka YOKOTA and Sumio YAMAMOTO

The paper describes the development of an efficient suction mechanism for the floor cleaning autonomous mobile robot. Because available space and energy source, batteries, on the mobile robot is limited, it is not feasible to design a suction mechanism by simply providing a powerful actuator for sucking. We first discussed requirements of the suction mechanism for floor cleaning. Then we determined appropriate shape of the nozzle by simulating the flow of dust particles in the nozzle in the suction mechanism. The performance of the developed suction mechanism is demonstrated by comparing the experimental results of this mechanism mounted on the robot with the vacuum cleaner operated by human in an office building.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Machinery, Suction Mechanism, Floor Cleaning Robot

1. はじめに

現在、駅、空港、大規模店舗、工場などの広域空間の清掃作業では、苛酷な労働条件下において多くの労働力および人件費を要するため、自動化への要求は高い。そこで我々は、清掃作業の省力化、省人化、作業不足対策をねらって自律走行式床面清掃ロボットの研究開発を進めており、本論文においてはロボットに搭載可能な塵埃吸引装置の開発について述べる。

一般に、床面から塵埃を吸引する吸引装置は、吸引装置のノズル内に、床面上の塵埃を掃き出す回転ブラシが設けられている。吸引モータを作動させると、回転ブラシによって掃き出された塵埃はノズルの吸い込み口から吸い込まれる空気と一緒に吸引ホース内に吸い込まれ、ごみ袋へ送られる。このとき、家庭用および小形業務用塵埃吸引装置では、吸引ノズルの開口部が小さいため、ノズル内に吸引された直後の風速低下による吸引能力不足は問題にはならない。しかし、大

形業務用の塵埃吸引装置では、ノズル内に回転ブラシが設けられている構造のために、吸引ノズルの開口面積および容積を大きく取らざるを得なくなり、ノズル内に吸引された直後の風速が大幅に低下し、砂などの重い塵埃を吸い込めない場合が多々生じる。

これまで、さまざまな清掃ロボットの開発および実用化が試みられてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。その中の多くは、吸引能力の低下を防ぐために小さな吸引ノズルを装備するか、あるいは、十分に塵埃を吸引できるようにロボットの走行速度を低く押えるという対策を取っている。このため、効率的な清掃作業をある程度犠牲にしているといわざるを得ない。また、比較的大きな吸引モータを搭載するロボットでは、外部からの電源供給に頼らなければならない、このため、ロボットの行動が拘束されてしまう。以上のように自律移動ロボットには、自己に必要な機能すべてを搭載しなければならない、そのため清掃装置を搭載する空間およびエネルギー供給源の確保など、さまざまな制約を受けることになるので容易な問題ではない。

そこで本研究では、ロボットに吸引装置を実装するのに伴う制約を考慮し、かつ風速低下を極力抑えられるよう吸引ノズル内の流れ解析を行い、これに基づき塵埃吸引装置の開発を行った。本論文では、まず第2

* 原稿受付 1998年7月21日。

^{*1} 正員、富士重工業(株) (〒321-8564 宇都宮市陽南1-1-11)。^{*2} 正員、(株)スバル研究所 (〒373-0026 太田市東本町10-1)。^{*3} 富士重工業(株)。^{*4} 正員、宇都宮大学工学部 (〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)。

E-mail: aoyamah@ut.subaru fhi.co.jp

章でロボットに搭載する際の塵埃吸引装置における要求仕様について示す。第3章では計算機シミュレーションによる吸引ノズルの設計について述べる。第4章では、計算機シミュレーションによる設計に基づいた吸引装置の製作、および実験結果を示し、本装置が有用であることを示す。

2. 清掃ロボットにおける吸引装置の要求仕様

2・1 清掃ロボットの概要 すでに我々は、車体、走行装置、制御装置、清掃装置から構成される清掃ロボットを開発し、その実用化を図ってきた⁽⁴⁾。図1に開発した清掃ロボットの外観を示す。ロボットの外形寸法は、幅720 mm、奥行き850 mm、高さ890 mmであり、質量は蓄電池を除いて80 kgである。

2・2 吸引装置の要求仕様 ロボットにおける清掃作業は、家庭用の掃除機のように前後方向に同一箇所を繰返し走行しながら、清掃してもよいのではなく、1回の走行で十分に清掃が行えることが必要である。単純に考えれば、吸引モータを大形化し、吸引性能を向上すればよいことになるが、ロボットに搭載できる吸引モータの寸法および出力は、搭載可能な空間および蓄電池の容量によって制限される。すなわち、十分な吸引力を得るために高出力あるいは大形のモータを利用することには限界が生じる。さらに、走行上の安全性から吸引装置が車体からはみ出てはならない。また清掃効率を考慮すると、可能な限り塵埃を吸引できるように開口部を大きくできることも要求される。

以上をまとめると、清掃ロボットにおける吸引装置の要求仕様として、(1)1回の走行で塵埃の取残しがないように清掃できること(十分な吸引力)、(2)移動ロボットに搭載可能であること(小形化)、(3)可能な限り長時間稼働できること(連続稼働)、(4)吸引幅

(ノズル)が広いこと(清掃効率)、の4点が求められる。

3. シミュレーションによるノズル形状の設計

3・1 要求仕様に基づくノズル形状およびパイプの配置 十分な吸引力を得るためには、風速低下にならないようにノズルの開口部を小さくする必要があるが、回転ブラシをノズルに内蔵した場合には開口部を大きくせざるを得ない。そこで、回転ブラシをノズル先端に取付けることによって、ノズルとブラシとを分離する構成とした。これによって、開口部を小さくしながらも、回転ブラシによる塵埃の掃き出しを行うことが可能となる。また清掃効率を得るために、吸引ノズル幅を車体幅に格納できる最大幅の700 mmとした。図2にその構成の概略を示す。なお矢印は空気の流れを示す。

ロボット内部においては、バッテリーおよびその前方

Fig. 2 View of the suction mechanism

Fig. 1 View of the mobile robot

Fig. 3 Layout of the pipe to the dust box from the suction nozzle

にダストボックスを配置することにした。このため、ノズルからダストボックスまでの配管を図3に示すようにバッテリーおよびダストボックスを避けるように配置することにした。

3.2 塵埃粒子の吸引条件 粒子が管内に浮遊する速度は、ほぼ粒子の終速度に等しいとみなせる。塵埃に含まれる典型的な粒子の比重は、花崗岩2.65, 安山岩2.26, 大谷石1.5, 一般的な硝子2.5, 石炭1.2~1.8, ケイ砂2.6~2.7である。粒子直径を1 mm, 比重を2.7として、おおよその浮遊速度を求めると7.5 m/sとなる⁽⁵⁾。

次に、現在使用されている業務用掃除機は、どの程度の風速で塵埃を吸引できるのかを確認するために、実際に1 m²のタイルカーペットに質量約2 gの砂をまいて吸引実験を行った。吸引ノズルの両側および中央部の風速はそれぞれ13.0 m/s, 13.0 m/s, 180 m/sである。その結果、十分に砂を吸引できることを確認した。このことから、十分な吸引を得るためには、風速13.0 m/s程度の風速が得られればよいことがわかった。

この吸引条件に基づき、以下の流れ解析において、吸引ノズル形状の詳細寸法を決定する。

3.3 吸引装置の流れ解析 一般に、定常非圧縮性流れの基礎方程式は、式(1), (2)で与えられる連続の式と運動方程式より成り立つ。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \Delta \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$: 速度ベクトル, p : 圧力, ρ : 密度, ν : 動粘性係数, そして ν_t : うず粘性係数である。

また、ブラシ回転部に相当する領域には、回転を考慮した運動方程式である式(3)を用いる。

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}) + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \Delta \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\mathbf{r}$: 位置ベクトル, そして $\boldsymbol{\omega}$: 回転ベクトルである。

式(3)において、左辺第2項がコリオリの力, 第3項が遠心力である。乱流モデルについては、複雑な流れ解析において最も一般的に用いられている標準 $k-\varepsilon$ モデル⁽⁶⁾を用いた。

以下の流れ解析では、汎用流体解析コード Fluont/UNS⁽⁷⁾を用いた。計算アルゴリズムとしては、SIMPLE法⁽⁸⁾を用い、対流・拡散項についてはPower Lowスキーム⁽⁸⁾によることにした。

3.4 回転ブラシの流れ場への影響 最初に二次

Fig. 4 Comparison between two types of velocity vectors

元解析により回転ブラシの流れ場への影響を検討した。吸い込み部の側断面を二次元モデルとした。実用機に搭載可能なブラシ機構の一般的な回転数を200 rpmとし、同様に搭載可能なモータから得られる吸引配管部の吸い込み風速を37.0 m/sとしてシミュレーションを行った。図4(a)は回転ブラシがある場合、図4(b)は回転ブラシがなく、ブラシ回転部に相当する流体領域にブラシ半径とブラシ回転数に相当する回転の効果を与えた場合の計算結果である。この図において、矢印は風速と風向きを示す。図4の左側のバーは色の濃淡で風速の絶対値を示しており、各矢印の濃淡によってそれぞれの風速を表している。図4の計算結果から考察すると、ブラシユニットのすき間からの吸引直後(A₁点, B₁点), 中央(A₂点, B₂点), ノズルすき間からの吸引直後(A₃点, B₃点)の風速は、それぞれ40 m/s, 30 m/s, 60 m/sとブラシの有無にかかわらずほぼ同じである。すなわち、吸い込み風の影響が大きいためブラシの回転の影響はブラシ形状を考慮せずに流体領域に回転の効果を与えても結果はほぼ同じとなる。このことからブラシが回転する空間領域においてはブラシ形状を考えず、ブラシ回転の効果を場に設定して以下の解析を行うことにした。また、ノズ

ルからの配管の結合部において段差のため流れに渦が生じることがわかった。このため、その結合部を滑らかにすることにした。

3.5 シミュレーションによる計算結果 図2に示すようにノズルとブラシとを分離した吸引装置およびその周辺空間(装置からの距離は100 mm)を解析対象とする。吸引ノズルの解析対象全体の格子図を図5に示す。ノズルの配管が斜めになっているのは、バッテリーおよびダストボックスを避けるためである。メッシュ数は総計91 692セルである。特に、床面と吸引ノズルとのすき間には不連続格子を採用し、すき間には最低4セル挿入するようにした。本シミュレーションでは、清掃ロボットは停止し、回転ブラシが200 rpmで一定で回転しながら空気を吸い込んでいる状態を考えることにする。

シミュレーション計算の結果を図6, 7に示す。図6および7において、矢印は図4と同様に風速と風向きを示すが、図からは判断しにくいのでいくつかの代表点について風速を数値で示した。

3.6 実験データとシミュレーション計算結果の比較 本シミュレーション結果に基づき吸引ノズルの模型を作成し、それを用いて実際に設定風速37.0 m/sで吸引させたときの風速を実測した。本研究で提案した吸引装置のノズル部の各点において測定した流速とシミュレーション計算結果を比較したものを表1に

Fig. 5 Lattice figure of the suction mechanism for calculation

Fig. 6 Velocity vectors near the central section in the nozzle

示す。ここで表中のA~Fは図2, 図6および7に示す流速測定点である。

シミュレーションによる計算値と実験値とを比較すると、実験値のほうが若干高い値となっている。シミュレーションでは平坦な床面を想定して計算しているが、実際にはカーペットの毛による盛り上がり等を考慮すると床とノズル間の距離が短くなり、みかけ上の開口面積が狭くなる。このため、シミュレーションによる計算値よりも実験値のほうが高くなったと考えられる。

表1より、次のことがわかる。(1)いずれの測定点においても、粒子吸引の目安とした風速13.0 m/sを越えており、設計した装置は十分に吸引能力を有する。(2)シミュレーションによる計算値と実験値がほぼ一致しており、吸引部の流れ場を定量的に把握することができる。(3)吸引モータによる配管部の風速と吸引ノズル形状が計算により明確であれば吸引能力を予測することができる。

4. 吸引装置の製作と清掃実験

4.1 吸引装置の製作 シミュレーション結果に基づき、図8に示す吸引装置を製作した。図9はロボットの後方より撮影した写真である。

小形化を図るため、吸引装置を駆動輪と後部キャストの間に配置することによって、車体内に本装置を納めることができた。さらに、ロボットの空き空間に収まるよう400 Wの吸引モータを2個配置した。この構成で、65 Ahの蓄電池を2個搭載した場合には、清掃に必要な連続稼働時間の2時間を得ることができ

Table 1 Comparison of velocities in simulation and experiment

Points	A	B	C	D	E	F
Simulation (m/s)	15.0	15.0	15.0	37.0	30.0	15.0
Experiment (m/s)	16.0	17.0	19.0	37.0	32.0	16.0

Fig. 7 Velocity vectors around the side in the nozzle

Fig. 8 Side view of the developed suction mechanism

Fig. 9 View of the developed suction mechanism mounted on the robot

る。

十分な吸引力を得るには、吸引ノズルと床面との距離が一定に保たれることが必要である。そこで、吸引ノズルのフレームに取付けたキャスタの高さを変えることによって、床面と吸引ノズルの間隔を調節できるようにした。これによって、カーペットの毛足の長さに合わせて吸引ノズルの位置を調節できる。さらに、シミュレーション結果より得られた形状の型を作り、アルミ鋳造によってノズルを作成した。これによって、その自重でノズルのゴムブレードを床に密着させることができ、吸引力の低下を防ぐことができる。

4・2 吸引能力実験 オフィスビルで7日間掃除を行わない場合、 1 m^2 あたり質量約 0.6 g の埃がたまるといわれている。本実験では、カーペット洗浄で用いられる洗剤を含んだとうもろこしの粉を乾燥させたものを塵埃試料(test dust)とし、これを 1 m^2 あたりに 2 g をまいたカーペットと、同量の試料を擦り込んだカーペットの二つの場合で実験を行った。ロボットがこれらのカーペット上を 0.25 m/s の速度で1回通過して吸引できた塵埃試料の質量を測定した。また比較対象として、 590 W のモータを有する一般業務用掃除機を用いて同一条件下で実験を行い、採取した塵埃試料の質量を測定した。その結果を表2に示す。この結果から、ロボットに搭載した吸引装置は、業務用掃除機の吸引能力とほぼ同じ程度か、あるいはそれ以上の吸引能力が得られていることを確認した。

Table 2 Mass rate of sucked the test dust

	Scattered	Rubbed
Vacuum cleaner	85.0% (1.70g)	55.0% (1.10g)
Cleaning robot	85.0% (1.70g)	70.0% (1.40g)

Fig. 10 Comparison of experimental results of floor cleaning by the robot with the vacuum cleaner in an office building

Fig. 11 Experiment of floor cleaning by the robot in an office building

4・3 オフィスビルでの実用清掃実験 本実験では、あるオフィスビルの幅 1.7 m 、長さ 30 m の比較的広い通路を作業環境とし、7日間掃除せずに放置した状態のカーペットを清掃させることによって、本装置が実用的に有用であるかを手作業による清掃と比較実験することにより確かめた。なお、ロボットの場合は作業の繰り返しを行わず、同一箇所の清掃は1回のみとしたが、手作業については日常の清掃と同様に同一箇所を数回繰り返し吸引してもよいこととした。

具体的には、ロボットによる1回めの清掃でどの程度塵埃を吸引できるかを求めた。その方法としては、まずロボットに清掃作業を行わせ、その直後、同一場所を手作業で丁寧に塵埃を採取し、ロボットが吸引した塵埃量と採取した塵埃量の和が通路に蓄積する塵埃の総量と仮定して、全体に対してどの程度吸引できたかを割合で求めた。そして、清掃作業の際のロボットの走行速度を 0.25 m/s 、 0.50 m/s 、 0.83 m/s に設定し、それぞれ別の階にある同様の通路で同実験を行った。また比較のため、4・2節と同じ業務用掃除機を用いて手作業による清掃を同一箇所で2回行い、同様に塵埃の吸引率を求めた。本実験の結果を図10に示す。

本実験結果より、ロボットの走行速度が比較的速い 0.83 m/s の場合では、清掃能力が低下するものの、0.50 m/s までは人間が掃除機を用いて行うのと同程度の塵埃を吸引できることを確認した。また、0.50 m/s の際のロボットによる清掃時間は、4 分 5 秒であり、人間による清掃時間は、5 分 22 秒であった。図 11 に本実験のようすを示す。

5. ま と め

本研究では、以下の結論を得た。

- (1) ロボットに塵埃吸引装置を実装するための要求仕様を明らかにし、それに基づいて開発を行った。
- (2) ノズル内の流れをシミュレートし、それに基づくノズル形状の設計を行うことによって効率化による塵埃吸引装置の性能向上を実現した。
- (3) 人手による清掃作業とロボットによる清掃作業とを比較実験し、塵埃吸引装置の実用性を示した。

今後、本ロボットによるオフィスビルの清掃作業の自動化を実用化する予定である。

文 献

- (1) 鈴木優, ビッグバードから清掃ロボットが舞う, ビルクリーニング, (1994), 10-25.
- (2) 三洋電機, 業務用掃除ロボット「CR-4」の開発に当たって, ビルメンテナンス, 5(1991), 54-57.
- (3) 鳥居元二, システム化した清掃ロボットの開発, R&A, 8 (1993), 26-30.
- (4) 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, 16-1 (1998), 57-64.
- (5) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (1960), 8-30, 日本機械学会.
- (6) Launder, B. E. and Spalding, D. B., Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.*, 3 (1974), 269-277.
- (7) *User's Guide for FLUENT/UNS & RAMPANT 4.0*, 1-2&4 (1996), 1.1-24.52, Fluent. Inc.
- (8) 水谷幸夫・香月正司, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 93-95, 130, 森北出版.