

直進転回走行型掃除ロボットの掃引作業効率の予測

小方 博之*¹, 鳥毛 明*², 江沢 昌紀*³, 齊藤 雄樹*⁴, 福本 裕介*⁴

Forecasting Task Efficiency of an “Air Hockey” Type Sweeping Algorithm for Robot Cleaners

Hiroyuki OGATA *¹, Akira TORIGE *², Akinori EZAWA *³, Yuki SAITO *⁴, Yusuke FUKUMOTO *⁴

ABSTRACT: This paper addresses to sweeping algorithms that mainly utilize sensory information, and are often used in domestic cleaning robots. In general, the algorithms adopted in such robots seem to be not very effective. To develop a more effective algorithm, a technique that can objectively compare the efficiencies is required. However, the efficiencies of algorithms may vary with environmental conditions. Consequently, we consider estimating them by evaluating under some conditions, and then deduce efficiencies in other conditions from them. In this paper, we investigate a method to forecast the efficiency of a sweeping algorithm given the environmental conditions like area map or sensory information in the initial stage of task.

Keywords: sweeping task, motion planning, robot cleaner, coverage algorithm, sensor-based method

(Received August 28, 2009)

1. はじめに

ロボットが作業を行う上で、動作の生成は重要である。本研究ではその中でも掃引動作、とりわけ床面掃除作業の動作を対象とする。掃引動作とは、あらかじめ指定された平面または曲面領域を満遍なく被覆することを目的とした動作であり、床面掃除の他に、塗装⁸⁾、研磨⁹⁾、地雷撤去¹⁰⁾、芝刈り⁶⁾などの作業に見られる。

床面掃除作業では、掃引動作を生成するアルゴリズムは事前計画重視型とセンサ情報重視型とに大別できる。事前計画重視型アルゴリズムは、作業領域の形状があらかじめロボットにとって既知であるとし、作業前に全体を効率的に掃引する経路を生成するものである。作業中に得られるセンサ情報は、主にロボットが経路を外れつつある場合にそれを補正することに使用する。

一方、センサ情報重視型アルゴリズムは、基本的に作業領域の形状を既知とせず、作業中に得られるセンサ情報を基に経路を決定していくものである。ここでは、センサ情報には、経過時間など、内部センサから得られる情報や履歴情報も含むとする。

床面掃除作業に用いられる、いわゆる掃除ロボットには業務用と家庭用の2つの用途があるが、それら間で要求されるスペックは異なる(表1)。

Table 1 Profile of business and domestic robot cleaners

	業務用	家庭用
重視する点	作業品質	価格 メンテナンスフリー
環境	静的 無人とみなせる	静的でない 有人
作業領域形状	事前に与えられる	事前に与えられない
作業領域面積	大きい	小さい
センサ	高機能でも許容される	単純、低価格、 必要最小限
作業への人の介入	ない	ある

すなわち、業務用途では清掃作業員の代用としての使用が想定されており、作業の質が高く、作業領域の隅々まで掃除がなされることが要求される。一方で、作業環境は静的とみなしてもよく、作業領域の形状情報があらかじめ与えられることを前提としても構わない。家庭用に比べて導入コストや管理コストが割高でも許容されるため、高機能なセンサを用いることができる。この観点から、業務用途には事前計画重視型アルゴリズムが適しているといえる。なぜなら、事前計画重視型アルゴリズムでは、計画段階で作業領域の形状情報が必要であり、

*1: エレクトロメカニクス学科教授 (ogata@st.seikei.ac.jp)

*2: エレクトロメカニクス学科准教授 (torige@st.seikei.ac.jp)

*3: 工学研究科機械工学専攻修了生 (現 (株)日立建機)

*4: 工学研究科機械工学専攻修了生 (現 大日本印刷(株))

作業実行段階では作業領域が静的な方がうまく作業が実行できるからである。また、GPS等の比較的高価なセンサを使用し、自分の絶対位置の高精度な把握が可能である²⁾。作業領域の面積は一般にロボットの大きさと比較して大きく、掃引作業効率を最大限に高める必要がある。

一方、家庭用途では、操作が簡単であることが要求され、購入者が作業領域の形状情報を入力するなどの操作は避ける必要がある。つまり、ロボットにとっては作業環境は未知である。また、手頃な販売価格にし、メンテナンスも最小限とするためには、できるだけ単純で低価格のセンサを最小限取り付けただけで済ませる必要がある、業務用のようにロボットの絶対位置を高精度で得ることは前提にできない。また、家庭の掃除環境ではテーブルや椅子のように、移動可能な障害物が存在し、作業環境が一定とも静的とも仮定できない。作業開始位置が通常不定であり、作業中に使用者によってロボットが向きを変えられたり別の場所に移動させられたりする可能性も考慮する必要がある。また、作業領域の面積は一般に小さい。このような作業条件では事前計画重視型アルゴリズムは使用できず、センサ情報重視型アルゴリズムの方が適しているといえる。

作業環境がロボットにとって未知という条件に対処するために、作業領域形状を学習し、その情報に基づいて掃引動作を生成する試みも見られるが^{5) 13) 14)}、実際に市販されている掃除ロボットのほとんどはセンサ情報重視型に分類されるアルゴリズムを使用している^{7) 18) 19) 20)}。

事前計画重視型に関してはいくつかの効率的なアルゴリズムの提案がなされている。代表的な方法は作業領域をいくつかの簡単な形状のサブ領域に分割し、それらを順次掃引していく方法である。青山ら¹⁾、Gabrielyら³⁾、Gonzalezら⁴⁾は作業領域をグリッド分割する手法を採用している。Wongら^{15) 16)}の研究ではスライス分割する手法がとられている。また、複数の掃除ロボットによる作業を前提とした研究もあり、オフセット線・ボロノイ線を用いて効率的な軌道を生成するアルゴリズムが倉林ら¹²⁾から提案されている。

その一方で、センサ情報重視型のアルゴリズムに関しては市販の家庭用掃除ロボットに様々なタイプのものが実装されているにもかかわらず、学術的に分析を行ったものは見られない。

現存のセンサ情報重視型アルゴリズムは必ずしも家庭用途に最適化されているとは言えない。例えば、家具などの障害物の存在する複雑な環境では掃除ムラが発生しやすい。図1は後述のシミュレータでセンサ情報重視型アルゴリズムの1つを実行させた場合の軌跡だが、掃引

が必要以上に行われている部分とほとんど行われていない部分が存在している様子が見られる。

本研究の目標は家庭用掃除ロボットに主に用いられるセンサ情報重視型アルゴリズムを分析し、より効率的なものを考案することにある。考案したアルゴリズムが効率的か判断するには、他のアルゴリズムと比較して評価できることが前提となる。しかし、作業領域の形状は様々であり、ある条件下での評価結果が他の条件下でも妥当とは限らない。そこで、いくつかの条件下で評価を行い、それらの結果から他の様々な条件下での作業の効率性を予測できれば、より正確な評価を行えると考えられる。この考えに基づき、本論文では家庭用掃除ロボットにおいて代表的なセンサ情報重視型アルゴリズムを取り上げ、作業効率の予測可能性について検討する。

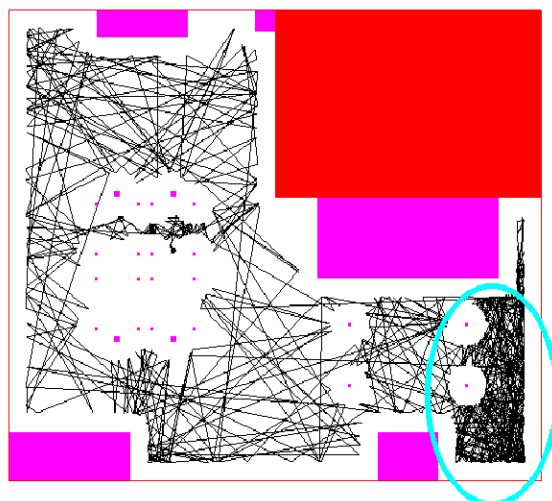


Fig.1 An example of trajectory of a robot cleaner (simulation)

2. センサ情報重視型掃引アルゴリズムの分類

市販または開発中の家庭用掃除ロボットに見られるセンサ情報重視型掃引アルゴリズムは、単独でも完全な掃引作業が可能で基本アルゴリズムと、単独では完全な掃引作業を行えないが基本アルゴリズムと併用すると効率を向上可能な付加アルゴリズムとを組み合わせたものが多い。

基本アルゴリズムには次のタイプが見られる。

直進転回型：直線的に移動し、壁や障害物に衝突すると方向転換を行うことを繰り返すもの（図2(a)）。

往復 (direction parallel) 型：直線的に移動し、壁や障害物に衝突すると、ロボットの作業有効範囲の幅 d だけ横に移動し、 180° 方向転換を行うことを繰り返すもの（図2(b)）。

境界平行(contour parallel)型：はじめに作業領域の境界に沿って1周し、その後、 n 周目には境界から $d \times (n-1/2)$ だけ内側に距離を保って周回するもの (図 2 (c))。

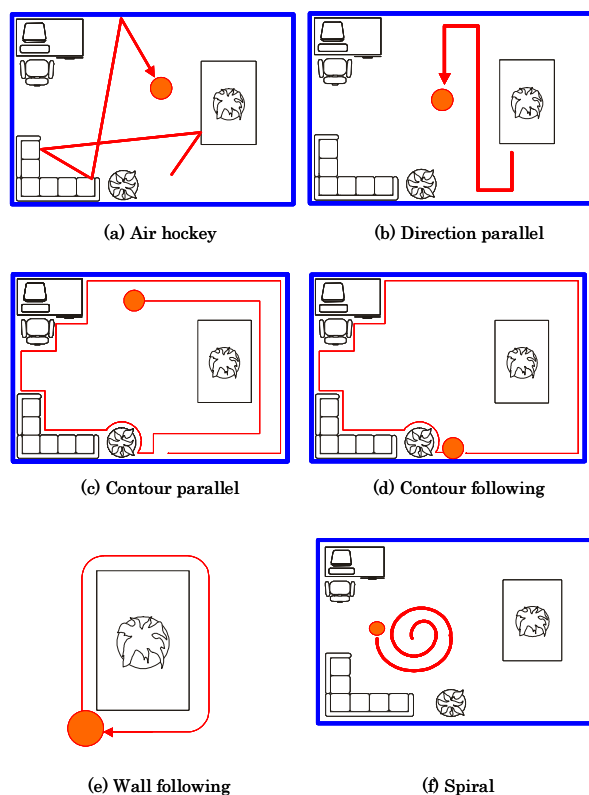


Fig. 2 Basic motion patterns for coverage algorithms

直線転回型は接触センサが搭載されていけばよいので、市販の家庭用掃除ロボットに最も一般的に見られる。往復型と境界平行型はマニピュレータを使用した塗装等の作業でもともと用いられているもので¹²⁾、一部の家庭用掃除ロボット¹⁷⁾にも見られる。マニピュレータを用いた作業では先端を高精度で位置決めできるが、家庭用掃除ロボットでは、安価なセンサで、平行に往復走行を行っているか、または作業領域の境界に平行に走行しているかを検出して動作を補正するという困難な問題に対処する必要がある。

付加アルゴリズムには次のタイプが見られる。

初期壁沿い1周型：掃引作業開始時に作業領域の外周を1周するもの。作業領域に関する情報を取得したり、ごみの溜りがちな周辺部を先行的に掃引したりする目的に行われることが多い (図 2 (d))。

壁沿い型：壁や障害物に衝突したら、それに沿って一定時間走行するもの (図 2 (e))。

螺旋型：アルキメデス螺旋の軌跡を描きながら、一定

時間または壁や障害物に衝突するまで走行するもの (図 2 (f))

3. 掃引作業効率の評価

掃引作業の効率を議論するために、本論文では以下の前提をおく。

- ・掃引アルゴリズムの側面のみに着目し、ロボットの作業有効範囲の大きさ、走行スピード、ごみの吸引力のようなハードウェア的条件などは共通とする。
- ・ロボットの作業有効範囲は底面全体とする。
- ・作業領域は、内部のすべての点がスタート地点からロボットによって到達可能なように設定されているとする。ロボットはその作業有効範囲に当該点を含むことによって到達したとみなす。例えば、円形の掃除ロボットに対しては、長方形の部屋の四隅は到達できないので作業領域に含めない。
- ・作業領域内の任意の点に対する掃除作業は、ロボットの作業有効範囲がその点を1回通過することによって完了するものとする。

この前提では、掃引のオーバーラップが少ないほど掃引作業効率が高いといえる。したがって、ある時点 t での掃引作業効率は、 t における既掃引面積を作業領域面積で割った値で表せる。この値をここでは掃引率と呼ぶ。掃引率は序盤から中盤にかけての掃引作業効率を比較するには便利だが、終盤には値が飽和値の1に近づき、比較対象との値の差が小さくなる欠点がある。また、作業全体の効率を数値的に比較するには適していない。そのため、必要に応じて以下で計算される掃引ポイントという値を用いる。

$$\text{掃引ポイント} = -\log(1 - \text{掃引率})$$

4. 掃引作業効率の評価

センサ情報重視型掃引アルゴリズムを分析するために掃引作業シミュレータを作成した。シミュレーションにおける設定条件を以下に述べる。

4.1 ロボット

市販の家庭用掃除ロボット (iRobot 社 Roomba original) を参考に、以下のように設定した。

- ・作業有効範囲：直径 35 cm の円内
- ・走行速度：32 cm/s
- ・回転速度：90 deg/s

また、直進転回型アルゴリズムを実現するために本

体前部に接触感知センサを搭載しているものとし、壁や障害物と接触するとランダムに方向転換を行うものとする。

4.2 作業領域

ロボットが到達可能な部分のみから構成される作業領域のデータを実験者が手作業で作成するのは困難である。そのため、本シミュレータでは実験者が掃引作業の対象となる部屋の形状データを作成し、その後、計算機でその部屋における作業領域を求める形をとる。

不動産屋やモデルルームで我が国のリビングルームの間取りを調査した結果、部屋の面積は 186000 cm^2 (約 12 畳) に統一することにした。なお、部屋面積を一定にしても、部屋形状により作業領域面積には若干の違いが生じる。

作業対象となる部屋の例と、そこで求められた作業領域を図 3 に示す。

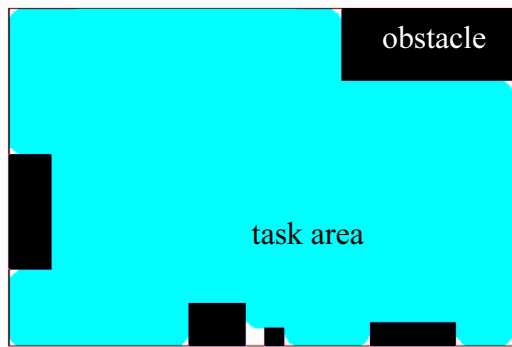


Fig. 3 The task area in a room (shaded area)

5. 直進転回型アルゴリズムの分析

シミュレータを用いて、直進転回型アルゴリズムの基本的な性質を調べた。

5.1 掃引率の変化

リビングルームとしてよく見られる 6 種類の部屋形状 (図 4) において、作業開始後 40 分までの掃引率の変化を観察した。40 分という時間はモデルにした市販掃除ロボットが 12 畳の部屋を掃除する場合の設定時間から決定した。

掃引率は時間につれて単調に増加するが、掃引のオーバーラップが影響して、滑らかに変化しない。また、ロボットの初期状態 (位置・姿勢) を一定に設定しても、直進転回アルゴリズムにはランダムな要素があるため、互いに同じようには変化しない。しかし、多数回の平均をとると、滑らかなカーブとなり掃引率の変化傾向が観

察できる。ここではこのカーブを平均掃引曲線と呼ぶ。

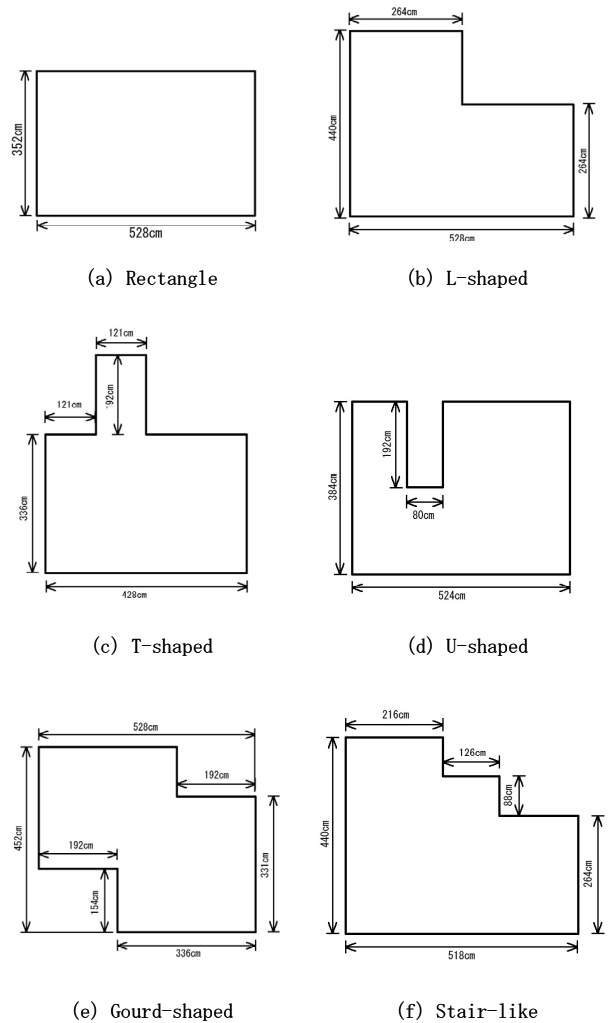


Fig. 4 Some major types of living rooms

5.2 ロボットの初期状態と掃引率

掃引率がロボットの初期状態に依存するか確かめる実験を行った。図 4 (d) のコの字型の部屋において、初期状態を 50 箇所設定し、各々について 100 回分の平均掃引曲線をプロットした結果を図 5 に示す。プロットでは、縦軸に掃引ポイントをとった場合でも、平均掃引曲線はほとんど重なっており、初期状態依存性が見られなかった。

一般に家庭では、充電ドックを用いないタイプの掃除ロボットの初期状態は不定だが、この結果は、掃引効率の評価にはその要素を考慮しなくてもよいことを示すものである。

以後のシミュレーションでは初期状態は作業領域内でランダムに設定する。

5.3 部屋形状と掃引率

次に、掃引率が、部屋面積一定の条件下で、その形状

に依存するか確かめる実験を行った。図4の6部屋に新たに5つの部屋形状を追加して、それらの11部屋について100回分の平均掃引曲線をプロットした結果を図6に示す。

プロットでは平均掃引曲線は重なっているとは言えず、掃引率は部屋形状に依存する結果となっている。

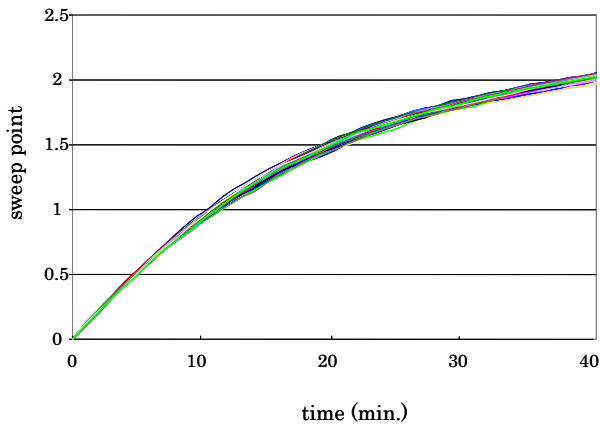


Fig. 5 Average change of sweeping point of the task in the same room but different start points

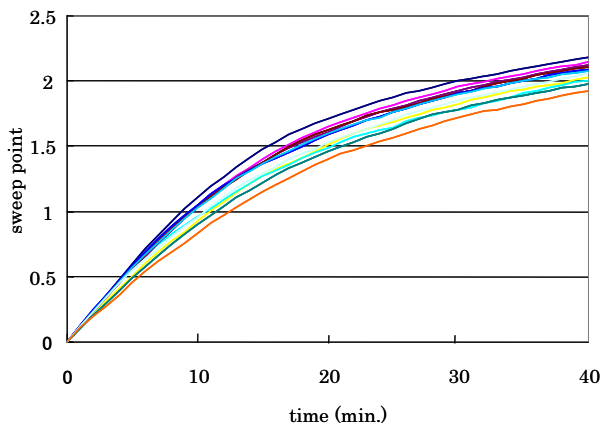


Fig. 6 Average change of sweeping point of the task in different rooms but at the same dimensions

6. 直進巡回型アルゴリズムの掃引ポイント予測

前節の結果を踏まえて、ここでは部屋形状から、直進巡回型アルゴリズムの掃引ポイントの予測が可能か検証する。

部屋形状からいくつかの特徴量を抽出し、パラメータ化した。6種類の部屋だけでは不十分なことから、特徴量抽出を容易にする理由から、ここでは改めて次のルールで108種類の形状の部屋を用意した。

- 440 cm × 528 cm の長方形の空間を 88 cm × 88 cm のセルに分割し、そのうちの6個を除去する。この

場合の部屋面積は、約12畳の185856 cm²となる。各部屋から抽出した特徴量は次の11種類である。

- 最大内接長方形：部屋に内接する最大の長方形を構成するセル数。セルの集中度を表すとみなせる。
- 障害物数：除去されたセルが空間内で形成する領域数。部屋形状の複雑度を表すとみなせる。
- 優角数：部屋を構成する辺の間の優角の数。これも部屋形状の複雑度を表すとみなせる。
- チャンネル数（3種類）：部屋を凸多角形に分解したとき、隣接する凸多角形間の辺の長さがセル1辺分、 $\sqrt{2}$ 辺分、2辺分となるものの個数。2辺分となるものの個数が多ければ、ロボットはチャンネルを越えての移動を比較的容易に行えると考えられる。一方、1辺分となるものの個数が多ければ移動が比較的困難と考えられる。
- セル隣接パターン（5種類）：隣接するセルのパターンが共通であるセルの数。4連結で考えた場合、隣接セルのパターンは以下の5種類のみである。

0型：隣接セルがいずれも障害物ではないパターン。

1型：隣接セルのうち、1個が障害物となるパターン。

2a型：隣接セルのうち、対向しない2個が障害物となるパターン。

2b型：隣接セルのうち、対向する2個が障害物となるパターン。

3型：隣接セルのうち、3個が障害物となるパターン。

これらの説明変数と掃引ポイントとの間に線形関係があると仮定し、重回帰分析での予測を試みた。赤池情報量規準(AIC)値を参考に、これらの中で、チャンネル数(辺の長さがセル1辺分のもの)、優角数、セル隣接パターン(0型、2b型)の4個を説明変数として選択した。これらの説明変数をそれぞれ $x_1 \sim x_4$ と置き、 y を掃引開始40分後の掃引ポイントの予測値としたところ、以下の重回帰式が得られた(図7)。

$$y = -0.014x_1 - 0.027x_2 + 0.025x_3 - 0.052x_4 + 1.802$$

重決定係数は0.86であり、線形モデルによって少数の特徴から有効な予測を行えるという結果が得られた。

7. オンラインでの掃引ポイント予測

次に、作業領域形状を事前を知ることでできない家庭用掃除ロボットが作業中に得た情報から将来の掃引ポイントを予測することを考える。将来の掃引ポイントを予測できれば、その作業環境により適したアルゴリズムを選択し、作業効率を高めることが可能になると考えられる。

ここでは、予測のために以下の情報を用いることにした。これらはいずれもモデルとした掃除ロボットのセンサから取得可能な情報である。

- ・ターン数：作業開始時から現時点までにロボットが障害物と衝突し、方向転換した回数。
- ・最大直進距離：現時点までに、ロボットが直進のみで移動できた最大距離。

部屋面積の共通な 150 種類の作業環境を用意し、将来の掃引ポイントが予測可能か実験を行った。各環境において、100 回ずつ掃引シミュレーションを行い、データを取得した。

まず、掃引開始後 20 分で、40 分時点での掃引ポイント y が予測可能かを調べた。ターン数 x_1 、最大直進距離 x_2 を説明変数とし、線形関係を仮定し、重回帰分析での予測を試みた。得られた重回帰式を以下に示す。重回帰係数は 0.82 であった。

$$y = -0.0045x_1 - 0.00037x_2 + 2.52$$

次に、掃引開始後 10 分のデータから同様に予測可能かを調べた。得られた重回帰式を以下に示す (図 8)

$$y = -0.0090x_1 - 0.00041x_2 + 2.50$$

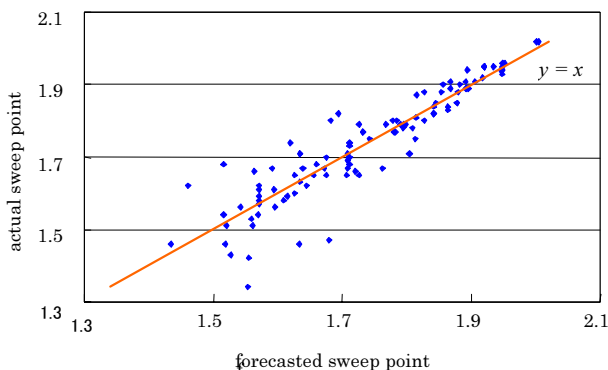


Fig. 7 Actual sweep point and the ones forecasted from the shape of the room

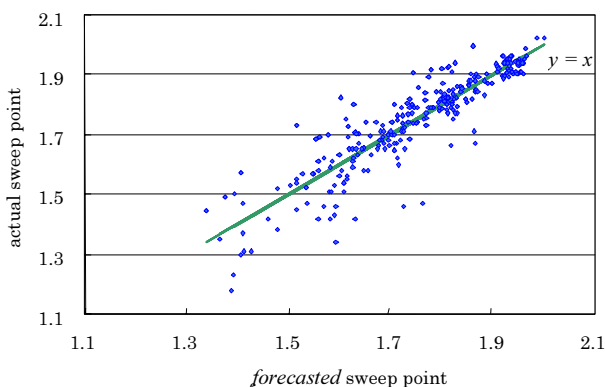


Fig. 8 Actual sweep point and the ones forecasted by sensing online

これも決定係数が 0.82 であった。20 分の場合と 10 分の場合の重回帰式を比較すると、ターン数の偏回帰係数は前者が後者の半分の値となっている。これは時間が倍になるとターン数もほぼ倍になることに対応する。また、最大直進距離の偏回帰係数と切片の値はほぼ等しい。これは 10 分も走行していれば最大直進距離がだいたい得られ、20 分時点でもその値にあまり変化がないことを示している。これらの解釈ができることから、得られた重回帰式は妥当といえる。

以上のことから、オンラインでも、線形モデルによって有効な予測が行えるという結果が得られた。

8. おわりに

本研究では、家庭用掃除ロボットで代表的な直進転回型アルゴリズムにおいて、部屋形状や、ロボットによって得られた作業初期のセンサ情報から、掃引作業の効率が予測可能であることをシミュレーションによって確認した。

参考文献

- 1) 青山 元, 田島茂樹, 横田友隆, 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) pp. 57-64.
- 2) 荒井 穰, 細田祐司, 柄川 索, 小関篤志, 田島泰治, 朝 康博, 岡田祐子: 家庭用掃除ロボットのシステム設計, 第 48 回自動制御連合講演会, (2005).
- 3) Y. Gabriely, E. Rimon: Spiral-STC: An On-Line Coverage Algorithm of Grid Environments by a Mobile Robot, International Conference on Robotics & Automation, (2002) pp. 954-960.
- 4) E. Gonzalez, M. Alarcon, P. Aristizabal, C. Parra: BSA: A Coverage Algorithm, Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, (2003) pp. 1679-1684.
- 5) 自律移動型の家庭用掃除ロボット, はいたつく 2003-10, 日立製作所, (2003) pp. 13-14.
- 6) Y.Y. Huang, Z.L. Cao, E.L. Hall: Region Filling Operations for Mobile Robot Using Computer Graphics, Conf. on Robotics and Automation, (1986) pp. 1607-1614.
- 7) T. Kurt: Hacking Roomba, John Wiley & Sons, (1996).
- 8) 宮脇国男, 定家康浩: NC 塗装ロボットの軌道精度評価法, 日本ロボット学会誌, 16, 7, (1998) pp. 1017-1025.

- 9) 成清辰生：非干渉化された位置と力のハイブリッド制御による研磨加工，日本ロボット学会誌，14，4，(1996) pp. 586-592.
- 10) K. Nonami, N. Shimoi, J. Huang Qing, D. Komizo, H. Uchida: Development of Teleoperated Six-legged Walking Robot for Mine Detection and Mapping of Mine Field, International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2000) pp. 775-779.
- 11) 岡田祐子, 柄川 索, 朝 康博, 荒井 穰, 田島泰治, 小関篤志, 細田祐司：家庭用掃除ロボットの動作制御アルゴリズム，第 48 回自動制御連合講演会，(2005).
- 12) 太田 順, 倉林大輔, 新井民夫：知能ロボット入門，コロナ社 (2001).
- 13) 東條直人：三菱電機（株）における生活支援ロボットの開発，ウイークエンド・セミナー資料，日本機械学会，(2003) pp. 23-28.
- 14) J. VanderHeide, N. Rao : Terrain Coverage of an Unknown Room by an Autonomous Mobile Robot, Technical Report ORNL/TM-13117, Oak Ridge National Laboratory, (1995) pp. 1-11.
- 15) S. Wong, B. MacDonald: A topological Coverage Algorithm for Mobile Robots, International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2003) pp. 1685-1690.
- 16) S. Wong, B. MacDonald: Complete Coverage by Mobile Robots Using Slice Decomposition Based on Natural Landmarks, 8th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, (2004), pp. 683-692.
- 17) 藪内秀隆, 甲田哲也：掃除ロボット『N-Robo』の開発について，ウイークエンド・セミナー資料，日本機械学会，(2003) pp. 43-49.
- 18) [http:// trilobite.electrolux.com/](http://trilobite.electrolux.com/)
- 19) [http:// www.karcher.com/](http://www.karcher.com/)
- 20) <http://www.kao.co.jp/>
- 21) <http://www.nedo.go.jp/expo2005/robot/work/page002.html>