

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-522231

(P2004-522231A)

(43) 公表日 平成16年7月22日(2004.7.22)

(51) Int.C1.<sup>7</sup>

**G05D 1/02**  
**B08B 13/00**  
**B25J 5/00**  
**B25J 13/00**

F 1

G 05 D 1/02  
G 05 D 1/02  
B 08 B 13/00  
B 25 J 5/00  
B 25 J 13/00

テーマコード(参考)

L 3 B 1 1 6  
J 3 C 0 0 7  
5 H 3 0 1  
A  
Z

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 79 頁)

(21) 出願番号 特願2003-504174 (P2003-504174)  
(86) (22) 出願日 平成14年6月12日 (2002.6.12)  
(85) 翻訳文提出日 平成15年1月31日 (2003.1.31)  
(86) 國際出願番号 PCT/US2002/018450  
(87) 國際公開番号 WO2002/101477  
(87) 國際公開日 平成14年12月19日 (2002.12.19)  
(31) 優先権主張番号 60/297,718  
(32) 優先日 平成13年6月12日 (2001.6.12)  
(33) 優先権主張国 米国(US)

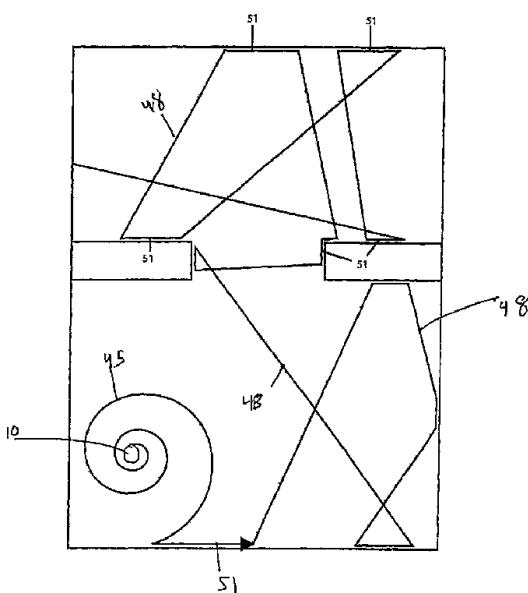
(71) 出願人 502432084  
アイロボット コーポレイション  
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州  
803、バーリントン、サウス アベニュー  
ー 63  
(74) 代理人 100077517  
弁理士 石田 敏  
(74) 代理人 100092624  
弁理士 鶴田 準一  
(74) 代理人 100108383  
弁理士 下道 晶久  
(74) 代理人 100082898  
弁理士 西山 雅也  
(74) 代理人 100081330  
弁理士 樋口 外治

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】自律型ロボット用マルチモード処理方法及びシステム

## (57) 【要約】

障害物追従モード(51)及びランダム反跳モード(49)を含む複数のモードで動作することにより、所与の領域を効率的に処理する移動ロボット(10)の制御システムが、提供される。他の実施形態では、効率を向上させるために、螺旋運動(45)のようなスポット処理モードや他のモードが併用されている。さらに、制御システムを実施するため行動ベースの構成が用いられ、完全な処理範囲を保証するために様々な脱出行動が用いられる。



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

移動ロボットにおいて、  
(a) 当該ロボットを表面に亘って移動させる移動手段と、  
(b) 障害物検出センサと、  
(c) 前記障害物検出センサ及び前記移動手段に対して動作可能に接続された制御システムとを備え、  
(d) 前記制御システムは、当該ロボットを複数のモードで動作させるように構成され、前記複数のモードが、スポット処理モード、当該ロボットが障害物の近傍を移動する障害物追従モードと、当該ロボットが障害物に遭遇した後に障害物から実質的に離反する方向へ移動する反跳モードとを含むことを特徴とする移動ロボット。10

**【請求項 2】**

前記制御システムは、最初に、前記スポット処理モードにて動作し、次に、前記障害物追従モードと前記反跳モードとの間で動作を交互に繰り返すように構成されている請求項1記載の移動ロボット。

**【請求項 3】**

前記スポット処理モードは、実質的に螺旋運動を含む請求項2記載の移動ロボット。

**【請求項 4】**

前記制御システムは、所定の移動距離後に、スポット処理モードに復帰するように構成されている請求項2記載の移動ロボット。20

**【請求項 5】**

前記制御システムは、所定時間経過後に、スポット処理モードに復帰するように構成されている請求項2記載の移動ロボット。

**【請求項 6】**

前記制御システムは、障害物相互作用間の平均距離が所定の閾値を超えた場合に、スポット処理モードに復帰するように構成されている請求項2記載の移動ロボット。

**【請求項 7】**

前記障害物検出センサは、触覚センサを備えている請求項1記載の移動ロボット。

**【請求項 8】**

前記障害物検出センサは、赤外線センサをさらに備えている請求項7記載の移動ロボット。30

**【請求項 9】**

前記障害物追従モードは、前記障害物検出センサが障害物を検出するまで、当該ロボットが前記障害物へと向かって回転するように、当該ロボットの回転半径を移動距離の関数として減少させることと、前記障害物検出センサが障害物を検出しなくなるまで、当該ロボットが前記障害物から離反して回転するように、当該ロボットの回転半径を移動距離の関数として減少させることとを交互に繰り返すことを含む請求項1記載の移動ロボット。

**【請求項 10】**

当該ロボットは、当該ロボットの動作幅の2倍を超えるとともに当該ロボットの動作幅の約10倍未満の距離を、障害物追従モードで動作する請求項1記載の移動ロボット。40

**【請求項 11】**

当該ロボットは、当該ロボットの動作幅の2倍を超えるとともに当該ロボットの動作幅の5倍未満の距離を、障害物追従モードで動作する請求項10記載の移動ロボット。

**【請求項 12】**

動作モードをマニュアルで選択する手段をさらに備えている請求項1記載の移動ロボット。

**【請求項 13】**

移動ロボットにおいて、  
(a) 当該ロボットを表面に亘って移動させる移動手段と、50

( b ) 障害物検出センサと、

( c ) 前記障害物検出センサ及び前記移動手段に対して動作可能に接続された制御システムとを備え、

( d ) 前記制御システムは、当該ロボットを複数のモードで動作させるように構成され、前記複数のモードは、当該ロボットが障害物の近傍を移動する障害物追従モード、及び当該ロボットが障害物に遭遇した後に障害物から実質的に離反する方向へ移動する反跳モードを含み、

( e ) 前記制御システムは、所定回数のセンサの相互作用後に、前記障害物追従モードに切り替わるように構成されていることを特徴とする移動ロボット。

【請求項 14】

前記所定回数のセンサの相互作用は、ランダムに決定される請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 15】

前記所定回数のセンサの相互作用は、約 5 回乃至 15 回である請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 16】

前記制御システムは、当該ロボットが前記障害物追従モードにて所定距離移動した後に、前記反跳モードに切り替わるように構成されている請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 17】

前記制御システムは、当該ロボットが最大距離移動するか、又は最小距離移動するとともに障害物に遭遇すると、前記反跳モードに切り替わるように構成されている請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 18】

前記最小距離は、少なくとも 115 cm である請求項 17 記載の移動ロボット。

【請求項 19】

前記最長距離は、520 cm 未満である請求項 18 記載の移動ロボット。

【請求項 20】

制御システムは、当該ロボットが移動した距離に基づいて動作モードを交互に繰り返す請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 21】

雑然度のレベルを決定する手段をさらに備えた請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 22】

前記の雑然度のレベルを決定する手段は、障害物との相互作用の回数を経時的に監視することを含む請求項 21 記載の移動ロボット。

【請求項 23】

前記表面の概略の領域を入力する手段をさらに備え、前記の雑然度のレベルを決定する手段は、その表面の概略の領域にさらに関係している請求項 22 記載の移動ロボット。

【請求項 24】

前記雑然度のレベルは、前記コントローラが動作モードを交互に繰り返す頻度と関連している請求項 22 記載の移動ロボット。

【請求項 25】

前記雑然度のレベルは、最小の障害物追従距離と正相関している請求項 21 記載の移動ロボット。

【請求項 26】

前記制御システムは、センサ入力が不足していることに基づいて、動作モード間を交互に繰り返す請求項 13 記載の移動ロボット。

【請求項 27】

前記制御システムは、オペレーション・システムプログラムを格納したメモリをさらに備え、前記オペレーション・システムプログラムは、複数の行動と、前記移動手段に対する制御がどの行動に委ねられるかを調停することとを含む請求項 1 記載の移動ロボット。

10

20

30

40

50

**【請求項 28】**

脱出行動をさらに含む請求項 27 記載の移動ロボット。

**【請求項 29】**

前記障害物検出センサは、触覚センサを備え、前記脱出行動は、前記障害物追従モードにて動作することを含む請求項 28 記載の移動ロボット。

**【請求項 30】**

前記脱出行動は、モータの失速事象の率により起動する請求項 28 記載の移動ロボット。

**【請求項 31】**

前記脱出行動は、前記のモータの失速事象の率が増加することにより起動する請求項 30 記載の移動ロボット。 10

**【請求項 32】**

前記脱出行動は、センサ入力が継続することにより起動する請求項 28 記載の移動ロボット。

**【請求項 33】**

前記脱出行動は、当該ロボットを停止させることを含む請求項 28 記載の移動ロボット。

**【請求項 34】**

前記脱出行動は、センサ入力が不足していることにより起動する請求項 28 記載の移動ロボット。

**【請求項 35】**

絶壁検出器をさらに備え、前記制御システムは、絶壁を検出すると当該ロボットの速度を 20 低下させるように構成されている請求項 13 記載の移動ロボット。

**【請求項 36】**

脱輪センサをさらに備え、当該ロボットは、脱輪センサ事象の率を前記制御システムへの入力として利用する請求項 13 記載の移動ロボット。

**【請求項 37】**

障害物を検出するセンサを具備した移動ロボットを制御する移動ロボット制御方法において、

- a . 螺旋走行運動で動作するステップと、
  - b . 障害物を検出することと、所定距離を移動することのいずれか早く起こった方の後に、前記螺旋走行運動を打ち切るステップと、
  - c . 障害物が検出されるまで、実質的に前方へ走行するステップと、
  - d . 前記の検出された障害物に沿って進路変更して走行するステップと、
  - e . 前記障害物から離反するように進路変更し、実質的に前方へ走行するステップと、
  - f . 以降、前記障害物に沿って走行するステップと、前記障害物から離反するように進路変更するステップとを、繰り返すステップと、
- を備えることを特徴とする移動ロボット制御方法。 30

**【請求項 38】**

センサ事象が所定回数発生した後、前記螺旋走行運動を繰り返すステップを、さらに含む請求項 37 記載の移動ロボット制御方法。

**【請求項 39】**

少なくとも最小距離であるが最大距離未満に対して、当該ロボットが前記障害物に沿って走行する請求項 37 記載の移動ロボット制御方法。 40

**【請求項 40】**

前記障害物センサは、前記境界を検出可能な赤外線センサを備えている請求項 39 記載の移動ロボット制御方法。

**【請求項 41】**

前記障害物センサは、触覚センサをさらに備えている請求項 40 記載の移動ロボット制御方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

**[仮出願の引用]**

本PCT出願は、2001年6月12日出願の米国仮出願番号第60/297,718号の優先権を主張する。

**【0002】****[発明の分野]**

本発明は、一般に、自律型車両やロボットに関し、特に、ロボット清掃機や芝刈り機に必要とされるか、あるいはロボット清掃機や芝刈り機として用いられる特定の領域を取扱う方法及び移動ロボット装置に関する。

**【0003】****[背景]**

ここでの説明のために、例として、ロボット清掃（例えば、ほこり払い、磨き掃除、掃き掃除、洗い落とし、乾式モップ、又は吸引清掃）に関するものとしての従来技術が直面する問題に注目したものを持たせる。しかしながら、特許請求された本発明は、特許請求の範囲そのものによってのみ限定されるものであり、屋内の家庭用清掃以外にも本発明の無数の用途が、当業者には理解されるであろう。

**【0004】**

ロボット技術者は、効率的な自律型清掃方法の開発に、長らく取り組んできた。概説すると、清掃ロボットの性能は、3つの成果基準に集約される。すなわち、処理範囲（coverage）、清掃速度、及び知覚効率である。処理範囲は、一定の清掃時間内にロボットが巡回可能な空間の割合（%）のことであり、ロボット清掃機は、稼働時間を無限にとると処理範囲が100%になることが理想的である。残念ながら、従来技術の設計では、多くの場合、清掃機がその仕事を完了するのに許されている時間を長くとっても、領域におけるある部分には到達しきれない。完全な処理範囲の処理が達成できないのは、機械的な制限による場合がある。例えば、ロボットの大きさや形状により、ロボットはある領域に到達できない、あるいは、ロボットが閉じ込められて、脱出できるようにその制御を変更できないといったことである。また、完全な処理範囲の処理が達成できないのは、処理（coverage）アルゴリズムが不適当なものであるためでもある。処理アルゴリズムとは、ロボットがその動作を制御するのに用いる命令の組のことである。本発明の目的に関しては、処理範囲は、有限の清掃時間内にロボットが巡回可能な領域の割合（%）として取り扱われる。機械的及び／又はアルゴリズム的制約により、使用可能な空間内のある領域が、体系的に無視されることがある。このような体系的な無視は、従来技術における重大な制限である。

**【0005】**

清掃ロボットの性能の第2の基準は、単位時間あたりに清掃される領域の単位として与えられる清掃速度である。清掃速度とは、清掃済みの床が増加してゆく速度のことである。処理速度とは、床がすでに清掃済みか又は汚い状態かにかかわらず、ロボットが床を処理（ここでは清掃）してゆく速度のことである。ロボットの速度が $v$ であって、ロボットの清掃機構の幅（有効幅とも呼ばれる）が $w$ であるとき、ロボットの処理速度は、単に $wv$ となる。しかし、清掃速度は、かなり低くなることが多い。

**【0006】**

閉じた空間で完全にランダムに動くロボットにおいて、ロボットの処理速度と比べて、清掃速度は時間の関数として減少してゆく。これは、ロボットが長時間稼動すると、それだけ、清掃済みの領域に巡回しがちとなるためである。処理速度と同等の清掃速度となって、不需要に同じ地点を再清掃してしまうことを最小化するのが、最良の設計である。すなわち、清掃速度の処理速度に対する比が、効率の基準であり、最適な清掃速度とは、既に清掃済みの領域を、累積して又は余分に通過する回数を、最小化しながら、指定された領域の最も大きな割合を処理（ここでは清掃）することを意味する。

**【0007】**

清掃ロボットの性能の第3の基準は、ロボットの知覚効率である。この基準は、従来技術においては無視されていた。計画的動作及び一定のパターンの動作は、利用者が計画的動

10

20

30

40

50

作を含んだロボットがより効率的であると感じるので、好ましいものである。

#### 【0008】

処理範囲、清掃速度、及び知覚効率は、ここで検討する性能の基準である。同時に、本発明の好適な実施形態では、様々な形状及び大きさの部屋（様々な未知の障害物を含む）での使用の容易さ並びにロボットの構成要素のコストが、さらに考慮されている。また、例えば衝突回避及び他の危険に対する適切な反応等の他の設計基準が、設計に影響する。

#### 【0009】

Jones, Flynn & Seiger, Mobile Robots: Inspiration to Implementation second edition, 1999, A K Peters, Ltd. や他のもので詳述されているように、真空吸引及び清掃ロボットを製作するための多くの試みがなされている。これらのロボットは、いずれも同様の課題に直面している。すなわち、限定された所与のエネルギー容量で、指定された領域を如何に効率的に処理するかという課題である。

#### 【0010】

我々は最大効率清掃に言及する。この最大効率清掃では、決定論的な清掃について清掃速度が処理速度に等しい。図1Aに示すように、決定論的な経路に追従するロボット1は、余分な清掃を避けて（一切重複して清掃せずに）領域2を完全に処理するように動く。決定論的な清掃では、ロボットが自身の現在位置及び過去の経路を認識していることが必要である。結果として測位システムが必要となる。このような測位システム（走査レーザー距離計（scanning laser ranger）、超音波変換器、搬送位相差GPS（carrier phase differential GPS）、又は他の方法に依拠する決定論的な清掃が可能なほどに正確であることが好ましい測位システム）は、実現不能なほどに高価であるとともに、利用者による特定の部屋の幾何学的形状に特有の設定を伴う。また、全地球測位に依拠する方法は、通例、測位システムのどの部分が故障しても機能しなくなる。

#### 【0011】

高度に複雑（そして高価な）センサ技術を用いて決定論的な清掃を実現しているものの一例として、Dennings Mobile Robotics and Windsor Industries製のRoboScrub装置がある。これは、ソナー（水中音波探知装置）、赤外線検出器、衝突センサ、及び高精度レーザーナビゲーションを用いたものである。RoboScrubのナビゲーションシステムでは、室内の様々な位置に大きなバーコードターゲットを取り付けることが必要となる。RoboScrubが同時に少なくとも4つのターゲットを視認可能という要件は、実用上の重大な問題である。従って、RoboScrubは、開放した広い領域の清掃用に限定されている。

#### 【0012】

他の例として、Kent Corporation製のロボットであるRoboKentは、RoboScrubと同様の全地球測位戦略に追従している。RoboKentは、RoboScrubのより高価なレーザー測位システムを不要としているが、そうすることによって、RoboKentは、例えば長い廊下等の単純な矩形状の領域にのみ制限される。このような、比較的制約された領域では、ソナー測距による位置補正で充分である。決定論的な清掃システムの他のものは、例えば、米国特許第4,119,900号（Kremnitz）、第4,700,427号（Knepper）、第5,353,224号（Lee et al.）、第5,537,017号（Feiten et al.）、第5,548,511号（Bancroft）、第5,650,702号（Azumi）に記述されている。

#### 【0013】

決定論的清掃の制約及び困難のため、ある種のロボットは、擬似決定論的方式に依拠している。擬似決定論的清掃を提供する一方法として、推測航法（Dead reckoning）として知られる自律型ナビゲーション方法がある。推測航法は、（例えば光学式軸エンコーダを用いて）ロボットの各駆動輪の回転を正確に計測することからなる。そして

10

20

30

40

50

、ロボットは、既知の出発地点及び方向が与えられた状態で、推定位置を算出可能である。この技術に伴う問題として、車輪のすべりがある。すべりが生じると、車輪のエンコーダは、その車輪が地面に対してロボットを駆動していないとも、車輪の回転を記録してしまう。図1Bに示すように、ロボット1が室内を進むにつれて、駆動輪のすべり誤差が累積するので、この種のシステムは、実用上の時間が経過した場合に信頼できないものとなってしまう。（その経路は、図1Aに示した決定論的な処理と比べると、もはや、しっかりと配列された列でできているというわけではない。）推測航法に依拠した結果、対処不能に系統的に無視されることが起こる。すなわち、床のある領域が清掃されないとということである。

## 【0014】

10

擬似決定論的システムの一例として、Robotics, Inc. のCyeロボットがある。Cyeは、推測航法のみに依存しているので、その推測航法システムの性能を最大化するために、大胆な基準を採用している。Cyeは、既知の場所において利用者が設けた物理的登録地点で開始しなければならない。なお、この地点において、ロボットは、その位置及び向きを決定する。そして、Cyeは、その地点から離れて移動しながら、位置を常時監視し続ける。Cyeが移動してゆくと、その位置及び方向における不確実性が増加してゆく。Cyeは、較正地点を発見不能な程にこの誤差が大きくなる前に、必ず較正地点に帰還することになっている。較正地点が移動したり、遮られたり、あるいは、車輪が過剰にすべったりした場合には、Cyeは道に迷ってしまう（迷ったことが分からないこともある）。このように、Cyeは、比較的狭くて良好な環境でのみ使用するのに適している。このアプローチの他の例が、米国特許第5,109,566号（Kobayashi et al.）及び第6,255,793号（Pelless et al.）に開示されている。

20

## 【0015】

ロボット清掃の他のアプローチとして、完全にランダムな動作のものがある。図1Cに示すように、障害物のない通常の部屋において清掃時間がかなり長時間であれば、ランダムな動作のアルゴリズムにより、満足な範囲が処理される。決定論的アルゴリズムのロボットと比較して、ランダムな清掃ロボットは、満足な範囲を処理するのに長時間を要する。ランダムに動作するロボットは、障害物のない部屋の98%を清掃するという高い信頼度を得るのに、同じ清掃機能を有して同じ速度で動く決定論的ロボットの約5倍走行しなければならない。

30

## 【0016】

図1Dに、ランダムなアルゴリズムの処理の限界を示す。部屋の中に障害物5があると、その部屋を複数の小室の集合体として分割する効果が生じる。このような部屋におけるランダムなアルゴリズムのロボットの処理範囲のオーバータイムは、限定された容量の小室内で放出された気体の経時的密度に類似している。最初のうちは、気体密度は、気体が放出された小室内で最も高く、比較的離れた小室では最も低くなっている。同様に、初期段階にてロボットは、開始したところの小室を、離れた小室よりも徹底的に清掃することになる。充分な時間が経過すると、気体は平衡に達して、全ての小室において密度が等しくなる。同様に、時間が経過すれば、ロボットは、全ての領域を徹底的に清掃することになる。しかしながら、実際上の電源供給の制約により、通常、ロボットには、障害物が散らかった状態の全領域を清掃するのには不充分な時間が保証されているにすぎない。我々は、この現象をロボット拡散問題と呼ぶ。

40

## 【0017】

検討したように、商用入手可能な従来例では、未知の形状の領域に対しては、効率的な処理アルゴリズムが得られない。上述のように、従来技術は、マーカーやビーコンの複雑なシステムに依拠しているか、あるいは、ロボットの用途が、単純な矩形状の室内に限定されている。擬似決定論的制御アルゴリズムを用いる試みでは、体系的に無視された空間領域が残されてしまうことがある。

## 【0018】

50

**[発明の概要]**

移動ロボットが領域を効率的に処理するために複数のモードで動作可能となるシステム及び方法を提供することを、本発明の目的とする。

**【0019】**

少なくとも1個のセンサを具備して、スポット処理、障害物追従、及び反跳（はね返り）等のいくつかのモードで動作する移動ロボットを提供することを、本発明の目的とする。

**【0020】**

さらに、確実に処理するために、障害物追従モードと反跳モードとを交互に繰り返す移動ロボットを提供することを、本発明の目的とする。

**【0021】**

ロボットが所定の距離を移動した後に、スポット処理へと復帰することを、本発明の目的とする。

**【0022】**

障害物間の平均距離を監視するとともに該平均距離を動作モード交替するための入力として用いることが可能な移動ロボットを提供することを、本発明の目的とする。

**【0023】**

ロボットが障害物追従モードで移動する距離を、障害物追従の頻度及びロボットの動作有効幅の関数として最適化し、障害物追従モードにて動作する最小距離及び最大距離を提供することを、本発明のさらに別の目的とする。

**【0024】**

複数の行動を実行可能であるとともにロボットに対する制御にどの行動が与えられるかの調停を用いるオペレーション・システムプログラムを有する制御システムを、移動ロボットに用いることを、本発明の好適な実施形態の目的とする。

**【0025】**

様々な脱出プログラムや行動を組み込んで、ロボットがスタッツクしないようにすることを、本発明のさらに別の目的とする。

**【0026】**

最後に、ここに開示された様々な目的及び利点を活かすように移動ロボットを制御する1つ又はそれ以上の方法を提供することを、本発明の目的とする。

**【0027】**

**[好適な実施形態の詳細な説明]**  
本発明のこれらの特徴及びさらなる特徴は、添付の図面を参照して明らかとなるであろう。

**【0028】**

本発明では、移動ロボットが、未知の幾何学形状の部屋において有効な処理速度にて最大の処理範囲を提供するように、設計されている。また、パターン化された動作すなわち計画的動作が組み込まれているために、ロボットの知覚効率が向上している。さらに、好適な実施形態では、効率的に処理するためには、ロボットが未知の環境内で動作不能となることを防止できる制御システムが必要である。

**【0029】**

移動ロボットの物理的構成は、当該技術分野にて既知であるので、ここでは、本発明の好適な具体例としての実施形態における構成要素について説明する。本発明の好適な一実施形態は、ある特徴を備えた実質的に円形状のロボット掃除機である。例えば図2に示すように、好適な実施形態の移動ロボット10は、機械的及び電気的構成要素を支持したシャーシ11を備えている。これらの構成要素としては、ロボットの前側部分に配置された2つの衝突センサ12、13、ロボットのシエル（以下、ケースと記す）15に配置された4つの絶壁センサ14、及びロボットのケース15に搭載された壁面追従センサ16等の様々なセンサ等がある。他の実施形態では、ロボットに1つだけのセンサが用いられてもよい。センサは、ソナー型、触覚型、電磁型、静電容量型等の様々な型のものであってもよいことが、当業者には理解されるであろう。コスト上の制約により、本発明の好適な実

10

20

30

40

50

施形態では、衝突（触覚）センサ 12, 13、並びに、絶壁センサ 14 及び壁面追従センサ 16 として反射型赤外線近接センサが、用いられている。赤外線センサの詳細は、米国特許出願番号（U.S.S.N.）09/768,773において説明されている。この米国特許出願番号 09/768,773 の開示は、本明細書に一体に組み入れられるものとする。

#### 【0030】

また、ロボットの好適な実施形態は、2つの車輪 20、該車輪を独立して回転させるモータ 21、安価な最も安いマイクロコントローラ 22、及び充電可能なバッテリ 23 又は当該技術に既知の他の電源を、備えている。これらの構成要素は当該技術で周知であるため、ここで詳細には説明しない。さらに、ロボット清掃機 10 は、1つ又はそれ以上の清掃ヘッド 30 を備えている。この清掃ヘッドは、真空掃除機、様々なブラシ、スポンジ、モップ、静電布、又は様々な清掃要素の組み合わせを含む。また、図 2 に示す実施形態には、サイドブラシ（side brush）32 も含まれている。

#### 【0031】

上述のように、ロボット清掃機 10 の好適な実施形態は、そのロボット 10 における支配的な側、非支配的な側、及び前側部分を規定した外側ケース 15 を、備えている。ロボットの支配的な側とは、ロボットが物体（又は障害物）の近傍を清掃するとき、その物体（又は障害物）に対して近接又は当接した状態に保たれる側のことである。図 1 に示すように、好適な実施形態では、ロボット 10 の支配的な側は、主たる進行方向に対し右側となっている。但し、他の実施形態では、支配的な側が左側であってもよい。さらに別の実施形態では、ロボットは対称であってもよく、それによれば、支配的な側というのは必要でない。しかしながら、好適な実施形態では、コストの理由から支配的な側が選択されている。図 2 に、主たる進行方向を矢印 40 で示す。

#### 【0032】

好適な実施形態では、2つの衝突センサ 12, 13 が、矢印 40 で示した前進方向を基準として、車輪 20 の前方に配置されている。衝突センサ 13 は、ロボット 10 の支配的な側に配置されており、他の衝突センサ 12 が、ロボット 10 の非支配的な側に配置されている。これら両衝突センサ 12, 13 が同時に作動したとき、ロボット 10 は、障害物が前方にあることを認識する。他の実施形態では、より多数又はより少数の衝突センサが用いられてもよい。同様に、任意の数の衝突センサが、清掃機を任意の数の放射状部分に区分するのに用いられてもよい。好適な実施形態では、衝突センサ 12, 13 は、ロボット 10 と障害物とが接触すると作動する赤外線遮断センサであるが、機械スイッチ、および、ロボットに接触した物体の静電容量、若しくはバンパ内で接触時に圧縮される2枚の金属板間の静電容量を検出する静電容量型センサを含む他の型のセンサが用いられてもよい。非接触センサは、ロボットが物体に対して近接したことを、その物体に物理的に接触することなく検出可能である。この非接触センサとしては、静電容量センサや赤外光のカーテン（curtain of IR light）等があり、これらが用いられてもよい。

#### 【0033】

表面が接触（又は近接）したことだけでなく、接触したことのロボットに対する角度をも通知可能なセンサを備えていると、便利である。好適な実施形態では、ロボットは、左右の衝突スイッチ 12, 13 が作動した場合に、両者の作動の時間差を算出することができる。そして、ロボットは、接触した角度を推定することができる。図 4A に示した好適な実施形態では、衝突センサは、ロボットの前側に、センサ 42, 43 を有する单一の機械式バンパ 44 を備えている。センサ 42, 43 は、実質的にバンパの両端にあり、該バンパの動作を検出する。バンパが圧縮されると、センサの事象同士の時間差が、ロボットが障害物に接触した角度を概算するのに用いられる。バンパが右側から圧縮された場合、バンパの追従及び衝突検出器の幾何学的形状により、右側の衝突センサが最初に衝突を検出し、引き続き、左側の衝突センサが衝突を検出する。このように、2つの衝突センサだけで、衝突角度が概算される。

#### 【0034】

10

20

30

40

50

例えば、図4Aでは、衝突センサ42, 43は、ロボットの前側部分を6つの領域(I~VI)に分割可能である。1つの衝突センサが作動すると、ロボットは、他のセンサが作動する前に(仮に作動するとして)時間を算定する。例えば、右側の衝突センサ43が作動すると、ロボットは、左側の衝突センサ42が作動する前に時間(t)を測定する。tがt<sub>1</sub>未満であれば、ロボットは、接触が領域IVで発生したものとみなす。tがt<sub>1</sub>以上かつt<sub>2</sub>未満であれば、ロボットは、接触が領域Vで発生したものとみなす。tがt<sub>2</sub>以上(監視時間内に左側の衝突センサ42が全く作動しない場合を含む)であれば、ロボットは、接触が領域VIで発生したものとみなす。衝突センサが同時に作動した場合には、ロボットは、接触がまっすぐ前で発生したものとみなす。この方法は、使用される時間測定及びバンパの幾何学的形状次第で、バンパを任意の多数の領域に(より高精度で)分割するのに用いられてもよい。機能拡張として、上記の例のように2次元だけとする代わりに、3次元で衝突角度を算出するのに、3つのセンサを用いてもよい。

10

#### 【0035】

また、好適な実施形態は、ロボット10の支配的な側に取付けられた壁面追従すなわち壁面検出センサ16を、備えている。好適な実施形態では、壁面追従センサは、壁面のしかるべき位置において有限体積で交差するように平行化された発光器及び検出器の対からなる赤外線センサである。この焦点は、ロボットの前進動作方向に、駆動車輪よりも約3インチ前方に位置している。壁面検出の半径範囲は、約0.75インチである。

20

#### 【0036】

また、好適な実施形態は、任意の個数の赤外線絶壁センサ14を備えている。なお、絶壁センサ14により、清掃機が階段や他の垂直の落ち込みで転落しないようになっている。これら絶壁センサは、壁面追従センサと同様の構成であるが、壁ではなく床を観測するよう向かっている。さらなる安全性及び検出手段として、ロボット10は、1つ又はそれ以上の車輪が床に支持されなくなったときにそれを検出可能な脱輪センサを備えている。従って、この脱輪センサは、絶壁だけでなく、電気スタンドの基部、床が高くなっているところ、コードの束等のように、ロボットが走行可能な様々な障害物をも、検出可能である。

20

#### 【0037】

他の実施形態では、他の既知のセンサあるいはセンサの組み合わせが用いられてもよい。

30

#### 【0038】

図3に、本発明の好適な実施形態のコントローラ及びロボットのハードウェアブロック図を示す。好適な実施形態では、Winbond W78XXXシリーズのプロセッサが用いられている。これは、36個の汎用I/Oポート、256バイトのRAM、及び16KのROMを有するMCS-51ファミリーと互換性のあるマイクロコントローラである。クロックは40MHzになっており、それが分割されて、プロセッサ速度が3.3MHzとなる。このプロセッサは、2つのタイマを備えている。これらのタイマは、センサの処理を行うとともにウォッチドッグタイマのように出力信号を発生するのに用いる割り込みを起動するのに、使用される。また、第1のタイマの最下位ビットは、行動に必要となる擬似乱数として用いられる。また、2つの駆動輪からのエンコーダ入力を取り込むのに用いる2つの外部割込みがある。また、プロセッサは、ロボット制御プログラムのテスト及びデバッグに用いるUARTを有する。

40

#### 【0039】

マイクロプロセッサのI/Oポートは、ロボットのセンサ及びモータに接続されており、ロボットの内部状態及びその環境に接続するインターフェースとなっている。例えば、脱輪センサが入力ポートに接続され、ブラシモータPWM信号が出力ポートに発生する。マイクロプロセッサ上のROMは、処理範囲及びロボットの制御プログラムを格納するのに用いられる。これには、行動(後述)、センサ処理アルゴリズム、及び信号発生が含まれている。RAMは、平均衝突距離、走行時間及び距離、並びに制御上の行動ID及び現在のモータコマンド等のロボットの動的状態を格納するのに用いられる。

50

#### 【0040】

ロボット清掃機の移動を理解するために、図4Bに、座標平面上のx軸及びy軸の中心とするロボットの方位を示す。この座標システムは、ロボットに取付けられている。ロボット10の指向性のある動作は、ロボット10が動ける半径で分かる。敏速に回転して壁100から離反するためには、ロボット10は、正の小さい値r(図4Bでは $r_3$ )を設定する。また、敏速に回転して壁へと向かうためには、ロボットは、負の小さな値r(図4Bでは $r_1$ )を設定する。一方、わずかに回転するためには、ロボットは、比較的大きな絶対値rを設定すべきである。正の値は左回転(すなわち壁から離反してゆく、図4Bでは $r_4$ )で、負の値は右回転(すなわち壁に向かってゆく、(図4Bでは $r_2$ )である。この座標系は、後述の制御例で用いられる。マイクロコントローラ22は、速度差を制御して回転半径を決定する。その速度差とは、各モータ21が個別に稼動するそれぞれの速度の差である。

10

#### 【0041】

また、ある実施形態では、ロボットには、1つ又はそれ以上の利用者の入力が含まれる。例えば、図2に示すように、好適な実施形態には、3つの単純なボタン33が含まれている。これらのボタン33により、利用者は処理される表面の概略の広さを入力可能である。好適な実施形態では、これらのボタンには、「S」(小)、「M」(中)及び「L」(大)のラベルが付されており、それぞれ、11.1、20.8及び27.9平方メートルの部屋に対応している。

#### 【0042】

上述のように、具体例としてのロボットは、本発明を実施するのに好適な実施形態であり、当業者は、当該分野で既知の構成要素を選択して、特定の目的用にロボットを設計することができる。好適な設計例としては、以下の米国特許に記述されているものを含む。すなわち、米国特許第4,306,329号(Yokoi)、第5,109,566号(Kobayashi et al.)、第5,293,955号(Lee)、第5,369,347号(Yoo)、第5,440,216号(Kim)、第5,534,762号(Kim)、第5,613,261号(Kawakami et al.)、第5,634,237号(Paranjape)、第5,781,960号(Kilstrom et al.)、第5,787,545号(Coleman)、第5,815,880号(Nakanishi)、第5,839,156号(Park et al.)、第5,926,909号(McGee)、第6,038,501号(Kawakami)、第6,076,226号(Reed)であり、これらは、参考として本明細書に一体に組み入れられている。

20

#### 【0043】

図5は、清掃機の様々な動作モードの簡略ブロック図である。好適な実施形態では、そして単なる例としてあるが、動作モードには、スポット清掃(利用者又はロボットが清掃の特定の領域を指定する)、縁端清掃、及び室内清掃がある。各動作モードは、命令及び/又は後述する内部行動の複雑な組み合わせを、含んでいる。但し、そのような複雑さは、利用者には通常わからないようになっている。一実施形態では、利用者は、入力要素(例えばセレクタスイッチや押しボタン)を用いて特定の動作モードを選択することができる。他の好適な実施形態では、以下に説明するように、ロボットは、複数の動作モード間を自律的に循環してゆく。

30

#### 【0044】

本発明の処理ロボットでは、領域を効率的に処理するのに、これらの様々な動作モードが用いられている。当業者はこれらの様々な動作モードを様々な既知の構成で実行できるが、好適な実施形態は行動制御に依拠したものとなっている。ここで行動とは、単に、相互に並列して実行される制御システムの複数の層のことである。そして、マイクロコントローラ22は、優先度が付された調停方式を実行して、所与のシナリオに対する支配的な行動を解決する。行動制御の説明は、Mobile Robots, supraに見られ、その本文が参考として本明細書に一体に組み入れられている。

40

#### 【0045】

すなわち、好適な実施形態では、ロボットのマイクロプロセッサ及び制御ソフトウェアは

50

、多数の行動を同時に実行する。状況に応じて、ロボットの制御は、1つ又はそれ以上の様々な行動に委ねられる。本発明の好適な動作を詳述すると、行動は、(1)処理行動、(2)脱出行動、又は(3)利用者／安全行動として説明される。処理行動は、主として、ロボットが処理動作を効率的に実行できるように設計されている。脱出行動は、1つ又はそれ以上のセンサがロボットに自由な行動が許されていないと示唆した場合に優先される特別な行動である。本明細書の約束事として、以下に検討する行動は、全て大文字で記述される。

#### 【0046】

##### 1. 処理行動 (Coverage Behaviors)

図6乃至図14に、好適な各動作モード、すなわち、スポット処理、壁面追従（又は障害物追従）、及び室内処理についての詳細を示す。 10

#### 【0047】

##### 動作モード：スポット処理

スポット処理、すなわち、例えばスポット清掃により、利用者は孤立した状態の汚れた領域を清掃可能である。利用者は、ロボット10を、清掃が必要な領域の中央近傍の床面上に配置し、スポット清掃動作モードを選択する。そして、ロボットは、例えば規定の半径内の近接領域にロボットの清掃ヘッド30やサイドブラシ32が接するように動作する。

#### 【0048】

好適な実施形態では、スポット清掃を実現する方法は、図6Aに示すような外向きの螺旋運動すなわちS P I R A L行動を提供する制御アルゴリズムである。一般に、螺旋運動は、回転半径が時間の関数として増加することにより生じる。好適な実施形態では、ロボット10は、支配的な側が外側に保たれて螺旋における先行する縁端となるために、その螺旋を反時計方向に開始する（図6Aに移動線45で示す）。図6Bに示す他の実施形態では、ロボット10の螺旋運動は、回転半径が減り続けるように、内方へと発生する。内向き螺旋を、図6Bに移動線45として示す。しかしながら、螺旋運動中に支配的な側を外側に保つことは、必須ではない。 20

#### 【0049】

好適な実施形態で用いるスポット清掃方法（外向きスパイラル）を、図7で説明する。一旦、螺旋運動が開始して（ステップ201）、 $r$ の値がその最小の正の値に設定される（可能な限り急な反時計方向の回転が生じる）と、螺旋行動は、 $r$ を螺旋行動開始時以降の角度変化を表すものとして、 $r$ の値を $\theta$ の関数として再計算する（ステップ210）。式 $r = a$  ( $a$ は定数)を用いることにより、螺旋のきつさ、すなわち螺旋の所望の重複が制御可能である。（なお、 $\theta$ は、2に規格化されていない。） $a$ の値は、式 $a = d / (2\pi)$ で選択される。ここで、 $d$ は、螺旋の連続した2つの経路間の距離である。効率的な清掃のためには、 $d$ の値は、清掃機構30の幅未満とすべきである。好適な実施形態では、 $d$ の値は、清掃ヘッド30の幅の1/2乃至2/3に設定される。 30

#### 【0050】

他の実施形態では、ロボットは、螺旋モードで移動した合計距離を記録している。ある距離になると螺旋の質が低下するためである。すなわち、表面に依存した車輪のすべり及び/又は螺旋概算アルゴリズムと計算精度の不正確さのため、時間が経過すると螺旋運動の中心点がずれる傾向にあるためである。ある実施形態では、ロボットは、6.3又は18.5メートルといった所定の距離（「最大螺旋距離」）を移動（ステップ240）した後に、螺旋モードから離脱する。好適な実施形態では、ロボットは、最初の螺旋又は後の螺旋を実行しているのかに応じて、複数の最大螺旋距離を用いる。衝突することなく最大螺旋距離に達した場合には、ロボットは、別の行動に制御を委ね、例えば、主に直線上に移動を続ける。（好適な実施形態では、直線（STRAIGHT LINE）行動は、優先度の低いデフォルトの行動である。この行動は、他の行動が作動していないときに、ロボットをほぼ直線上に、約0.306 m/sの予め設定された速度で進行させる。 40

#### 【0051】

螺旋モードでは、障害物に遭遇した場合に様々な動作がなされる。例えば、ロボットは、 50

(a) 障害物を回避して反時計方向に螺旋運動を続けようとするか、(b) 障害物を回避して反対方向に螺旋運動を続けようとする(例えば、反時計方向から時計方向に変更する)か、又は(c) 動作モードを変更することができる。反対方向に螺旋運動を続けるのは、反射螺旋(reflective spiral)として知られており、図6Cに示されている。ここでは、ロボット10は、障害物101に接触したときに、動作経路45を反転させている。好適な実施形態では、ステップ220に詳述するように、衝突センサ12又は13が最初の障害物に遭遇したときに、ロボット10はスポット清掃モードから離脱する。

#### 【0052】

好適な実施形態は、スポット処理のための螺旋運動で説明されているが、自身に拘束されたあらゆる領域が使用可能である。このような領域として、制限するのではないが、正方形、六角形、楕円等の通常の多角形状等がある。

#### 【0053】

動作モード：壁面／障害物追従

壁面追従、すなわち清掃ロボットの場合には縁端清掃により、利用者は、部屋の縁端や室内の物体の縁端のみを清掃可能である。利用者は、清掃すべき縁端の近傍の床面上にロボット10を配置し、縁端清掃動作モードを選択する。すると、ロボット10は、縁端を辿るように動作して、ロボットの清掃ヘッド30が当接した全ての領域を清掃する。

#### 【0054】

図8に、部屋110の中でのロボット10の動作を示す。図8Aにて、ロボット10は、その支配的な側が壁面に隣接するように、壁面100に沿って配置されている。そして、ロボットは、移動経路46を辿って、無制限に壁面に沿って走行する。同様に、図8Bでは、ロボット10は、障害物101に近接して配置される。そして、ロボットは、無制限に移動経路47を辿って障害物101の縁辺に沿ってゆく。

#### 【0055】

好適な実施形態における壁面追従モードでは、ロボットは、壁面追従センサ16を用いて、自身の位置を壁から所定の距離に定める。そして、ロボットは、壁の周囲に沿って移動を続ける。図8A及び図8Bに示すように、好適な実施形態では、ロボット10は、壁100と他の固体の障害物101とを区別できない。

#### 【0056】

図9Aに、好適な実施形態にて壁面追従に用いられている方法を示す。この方法により、1ビットのセンサにても、滑らかな壁面追従動作が得られる。(ここで、1ビットのセンサは、壁とセンサとの間の距離ではなく、特定の体積内において壁が存在しないことを検出する。) 衝突検出やソナーセンサ等の壁や物体を検出する他の方法が、用いられてもよい。

#### 【0057】

壁面追従動作モード、すなわち好適な実施形態の壁面追従動作が一旦開始すると(ステップ301)、最初にロボットは、操舵のための初期値を $r_0$ に設定する。そして、壁面追従行動は、壁面追従センサ16における発光-検出(emit - detect : e - d)ルーチンを開始する(ステップ310)。センサ16の赤外線発光部分に関する反射があると、それは、センサ16から所定の距離内に物体が存在しているものと解釈される。そして、壁面追従行動は、反射(物体が範囲内にある)から非反射(物体が範囲外となる)への遷移があったかどうかを判別する(ステップ320)。遷移があった(すなわち、今や壁は範囲外である)場合、 $r$ の値は絶対値が最大の負の値に設定され、ロボットはわずかに右方へと向きを変える(ステップ325)。そして、ロボットは、発光-検出シーケンスを再開する(ステップ310)。反射から非反射への遷移がなかった場合、壁面追従行動は、非反射から反射への遷移があったかどうかを判別する(ステップ330)。このような遷移があったならば、 $r$ の値は、正の最大値に設定され、ロボットはわずかに左方へと向きを変える(ステップ335)。

#### 【0058】

10

20

30

40

50

いずれの型の遷移事象も発生していなければ、壁面追従行動は、 $r$  の絶対値を低減し（ステップ340）、発光 - 検出シーケンス（ステップ310）を開始する。 $r$  の絶対値が減少することにより、ロボット10は、現在向いている方向がどちらであるにせよ、より鋭く回転するようになる。好適な実施形態では、 $r$  の絶対値の減少率は、移動距離に依存した一定の率となっている。

#### 【0059】

壁面追従モードは、所定時間若しくはランダムな時間、所定距離若しくはランダムな距離、又は、ある追加の条件が満たされるまで（例えば衝突センサが作動すること等）継続し得る。ある実施形態では、ロボットは、壁面追従をいつまでも継続する。好適な実施形態では、図8C及び図8Dに示すように、最小（MIN）移動距離及び最大（MAX）移動距離が検出され、それにより、ロボットは、最大移動距離を移動する（図8D）か、あるいは少なくとも最小移動距離を移動して障害物に突き当たる（図8C）まで、壁面追従行動を続ける。壁面追従行動のこの実装により、ロボットは、他の動作モードに比べて、適切な時間、壁面追従行動をとることが保証され、これにより体系的に無視されることを少なくし、処理範囲を全領域に分布させる。壁面追従を増やすことにより、ロボットはより広い空間を移動可能となるが、ある一部の空間を清掃するのには効率が低下する。さらに、障害物検出後に壁面追従行動から離脱する傾向にあると、ロボットは、知覚効率を向上させる。

#### 【0060】

図9Bは、どのような場合に壁面追従行動から離脱するかを決定する本実施形態を示すフローチャートである。最初に、ロボットは、壁面追従の最小距離（ $d_{min}$ ）及び壁面追従の最大距離（ $d_{max}$ ）を、決定する。壁面（又は障害物）追従モードにあるとき、制御システムは、そのモードにてロボットが移動した距離（ $d_{WF}$ ）を監視している。 $d_{WF}$  が  $d_{max}$  より大きい場合（ステップ350）、ロボットは、壁面追従モードから離脱する（ステップ380）。一方、 $d_{WF}$  が  $d_{max}$  未満（ステップ350）であるとともに、 $d_{WF}$  が  $d_{max}$  未満（ステップ360）である場合、ロボットは、壁面追従モードに留まる（ステップ385）。 $d_{WF}$  が  $d_{min}$  より大きく（ステップ360）、かつ障害物に遭遇した（ステップ370）場合には、ロボットは、壁面追従モードから離脱する（ステップ380）。

#### 【0061】

理論的には、ロボットが壁面追従モードで移動する最適距離は、室内の広さ及び構成並びにロボットの大きさの関数である。好適な実施形態では、壁面追従に留まるための最小距離及び最大距離は、室内のおおよその広さ、ロボットの幅、及びランダム要素に基づいて設定される。これによると、平均的な最小移動距離は、 $2w/p$  である。但し、 $w$  はロボットの作動要素の幅であり、 $p$  は障害物との所与の相互作用にてロボットが壁面追従行動に入る確率である。例えば、好適な実施形態では、 $w$  は約15cm乃至約25cmであり、 $p$  は0.095である（障害物追従モードに入る前にロボットが6乃至15個の障害物に遭遇、すなわち平均で10.5個の障害物に遭遇）。次に、最小距離は、約115cm乃至約350cmにてランダムに設定され、最大距離は、約170cm乃至約520cmにてランダムに設定される。ある実施形態では、最大距離と最小距離との比は、2:3になっている。知覚効率のために、障害物追従モードにおけるロボットの初期動作は、障害物追従モードにおけるその後の動作よりも長く設定されていてよい。さらに、利用者はロボットを始動させるときに、最も長い壁に沿ってそのロボットを配置してもよい。このことにより、知覚される処理範囲と同様に実際の処理範囲も広くなる。

#### 【0062】

また、壁面追従モードにてロボットが移動する距離は、遭遇する物体の数及び頻度（他のセンサにより検出）に依存して、そのロボットにより設定されてもよい。これは、室内の「雑然度」の指標となる。遭遇する物体が多いほど、ロボットは、全ての床面領域に進出するように、より長距離に亘って壁面を追従することになる。反対に、遭遇する物体が少ないほど、ロボットは、中央の空間を通過するのを優先させて、空間の縁端を過度に処理

10

20

30

40

50

しないように、より短く壁面を追従することになる。また、最初の壁面追従距離は、壁面追従行動の制御にある最初の期間、ロボットがより長い距離又はより短い距離だけ壁面を追従可能となるように考慮されてもよい。

#### 【0063】

好適な実施形態では、ロボットは、例えば $270^\circ$ を超えて回転して壁（又は物体）を特定不能となった場合、又は、壁面追従モードに入つてから合計で $360^\circ$ 回転した場合、壁面追従モードを離脱してもよい。

#### 【0064】

ある実施形態では、壁面追従行動が作動していて、ぶつかったとき、整列（ALIGN）行動が作動する。整列行動により、ロボットは、反時計方向に回転して壁面に揃えられる。常に、ロボットは、多数の小回転のサイクルに入らないように、最小角度回転する。最小角度回転した後、ロボットは、壁面センサを監視する。壁面センサが壁面を検出した後に検出しなくなつたならば、ロボットは、回転をやめる。これは、壁面追従範囲の端部において、ロボットが壁面追従を開始するために良好に揃えられているためである。ロボットは、壁面センサがオンになってからオフになるのを最大角度に達する時間内に検知しなかつた場合、とにかく停止する。このことにより、ロボットは、壁が壁面センサの範囲外となつたときに完全に1回転してしまわなくてすむようになる。直近に突き当たつたのが、支配的な側のバンパの側面 $60^\circ$ 以内であった場合、最小角度が $14^\circ$ に設定され、最大角度が $19^\circ$ に設定される。それ以外の場合、突き当たつたのが支配的な側又は非支配的な側の前側 $30^\circ$ 以内であれば、最小角度が $20^\circ$ に設定され、最大角度が $44^\circ$ に設定される。整列行動は、回転が完了すると、制御を壁面追従行動に渡す。

#### 【0065】

##### 動作モード：室内処理

ここで、第3の動作モードを、室内処理すなわち室内清掃モードと称する。これにより、利用者は、壁、階段、障害物、又は他の遮蔽物により拘束された領域を清掃可能となる。この選択を実行するために、利用者は、ロボットを床に置いて、室内清掃モードを選択する。そして、ロボットは、到達可能な全領域を清掃しながら室内を移動する。

#### 【0066】

好適な実施形態では、室内清掃行動を実行する方法は、直線行動（STRAIGHT LINE）と組み合わされた反跳（はね返り）行動（BOUNCE）である。図10に示すように、ロボット10は、障害物101又は壁100に突き当たつて衝突センサ12及び／又は13が作動するまで移動する。そして、ロボット10は、回転して、移動を続ける。動作経路の例を、図11に線48として示す。

#### 【0067】

図10に、ランダムな反跳行動のアルゴリズムを示す。ロボット10は、衝突センサ12及び／又は13が作動する（ステップ410）まで、前進動作を続ける（ステップ401）。そして、ロボット10は、1つ又は複数の衝突センサのどれが作動したかを検出したことに基づいて、許容範囲内の新たな方向を算出する（ステップ420）。そして、ロボットが遭遇した物体に対して $90^\circ$ 乃至 $270^\circ$ というような許容範囲内において、新たな進路を選択するためのある種のランダムな計算で、決定がなされる。ロボットが突き当たつた物体の角度は、左右の衝突センサ間のタイミングを用いて、上述のように決定される。そして、ロボットは、その新たな進路へと向かう。好適な実施形態にて、進路変更は、新たな進路へと向くのに動作が最小で済む方向に基づいて、時計方向又は反時計方向の回転となる。他の実施形態にて、進路変更には、ロボットの処理効率が増加するように前進することが伴う。

#### 【0068】

ロボットによりなされる進路選択の統計は、許容範囲全体に均一に分散される。すなわち、許容範囲内のあらゆる進路に同等な機会がある。その代わりに、我々は、ガウス分布や、ロボットを壁から垂直に回避せるように優先的に動かすように設計された他の分布に基づいた統計を選択することができる。

10

20

30

40

50

## 【0069】

他の実施形態にて、ロボットは、外部的なセンサの作動に基づくのではなく、ランダムにあるいは所定の時間で進路変更できる。その代わりに、ロボットは、長距離センサに基づいて小規模の角度補正を継続的に続けて、物体に接触するのを防いでよい。それにより、湾曲した経路で表面領域を処理できる。

## 【0070】

好適な実施形態では、ロボットは、反跳相互動作がある回数に達するまで、室内清掃モードに留まる。この回数は通常6乃至13である。

## 【0071】

## 2. 脱出行動 (Escape Behaviors)

10

全領域を効率的に処理するのを妨げる領域を処理しようとする間に、ロボットが遭遇しうるいくつかの状況がある。ロボットがこのような状況から出られるように、一般的な種類のセンサ及び脱出行動と称する行動が、設計されている。あるいは、極端な場合には、ロボットが脱出できないと決定されたならばロボットをオフにするように、設計されている。ロボットの様々な行動の中で、脱出行動を優先させるかどうかを決定するために、ロボットは、以下のことを決定する。(1)脱出行動が必要であるか、(2)そうであるならば、どのような脱出行動が認められるか。

## 【0072】

例として、以下の状況により、室内清掃ロボットに必要とされる脱出行動、及び走行するのに適切な行動の状況を説明する。

20

## 【0073】

(i) 状況1. ロボットは、スタックリーしまう状況を検出する。例えば、ロボットにとって斜路のようにはたらく、敷物の高くなつた所やスタンドの基部の近くを検出する。ロボットは、その状況から抜け出すために、小規模な「パニック」進路変更行動をとる。

## 【0074】

(ii) 状況2. ロボットが物理的にスタックリーする。例えば、ロボットがソファーの下や壁に食い込む、コードや敷物の房に絡まる、あるいは、電気コードの束の上にスタックリーして車輪が空転する。ロボットは、大規模なパニック進路変更行動をとり、関連するモータをオフにして障害物から脱出する。

30

## 【0075】

(iii) 状況3. ロボットが小さな限定された領域に入る。例えば、その領域は、ロボットが、椅子の脚やドレッサーの下に空いた領域、あるいはスタンドが部屋の隅に近接して置かれてできた小領域である。ロボットは、バンパを用いて縁端を辿り、及び/又は、その領域から脱出するためにパニック進路変更を実行する。

## 【0076】

(iv) 状況4. ロボットがスタックリーして自由が奪われる。例えば、ロボットは、上記の分類(iii)の1つの事例になっていて、そのあらゆるパニック行動によっても自由になれない状況である。この場合、ロボットは動作を停止し、信号を発して利用者に救援を求める。これにより、バッテリ寿命が保たれ、床や家具の損傷が防げる。

40

## 【0077】

各脱出状況を検出するために、様々なセンサが用いられる。例えば、

(i) 状況1. (a) ブラシやサイドブラシの電流が閾値よりも上昇しているとき、関連するモータに印加される電圧は減少する。このことが起こるときにはいつでも、失速率の変数が高くなっている。電流が閾値未満であるときには、失速率は減少している。失速レベルが低い側の閾値よりも上昇して、その変化率(傾斜)が正であれば、ロボットは、小規模なパニック進路変更行動を実行する。そのレベルがゼロになってから再び閾値に達したときに、小規模なパニック進路変更行動のみを再度実行する。(b) 同様に、脱輪レベル変数がある。この脱輪レベル変数は、脱輪事象が検出されたときに増加し、時間とともに着実に減少していく。脱輪事象が検出されて脱輪レベルが閾値を超えていれば(何回か脱輪が起こったばかりであることを意味する)、ロボットは、脱輪レベルに基づいて小規

50

模又は大規模なパニック進路変更行動を実行する。

【0078】

(i i) 状況2.(a) ブラシ失速率が高い側の閾値を超えていて、その変化率(傾斜)が正である場合、ロボットは、ブラシの回転を13秒間オフにして、大規模なパニック進路変更行動を1、3、及び7秒実行する。13秒が経過すると、ブラシは再びオンになる。(b) 走行失速率が中間の閾値を超えて、その変化率が正である場合、ロボットは、大規模なパニック進路変更行動を継続的に実行する。(c) 走行失速率が高い側の閾値を超えた場合、ロボットは、全てのモータを15秒間オフにする。15秒が経過すると、モータは再びオンになる。(d) ロボットのバンパが5秒間継続して抑えられた場合(側面食い込み状況として)、ロボットは、大規模なパニック進路変更行動を実行する。バンパが開放されるまで、5秒毎にパニック進路変更行動を繰り返す。(e) ロボットが20フィートに亘って何にも衝突しなければ、車輪の空転で動かなくなつたものと推定される。自由になるために、螺旋運動を実行する。螺旋運動終了後にも10フィートにわたって衝突しなければ、大規模なパニック進路変更行動を実行する。衝突するまで、これを10フィート毎に繰り返す。

10

【0079】

(i i i) 状況3.(a) 衝突と衝突との間の平均距離が低い側の閾値未満となつた場合、ロボットは、バンパを用いて縁端を辿って、限定された領域からの離脱を試みる。(b) 衝突と衝突との間の平均距離が非常に低い閾値未満となつた場合、ロボットは、大規模なパニック進路変更行動を実行して、限定された領域から脱出するためにより良くなるよう向きを変える。

20

【0080】

(i v) 状況4.(a) ブラシが失速して、何度かオフになつたばかりで、ブラシ失速率が高く、しかも変化率が正である場合、ロボットは停止する。(b) 走行が失速してモータが何度もオフになつたばかりで、しかも走行失速率が高くて変化率が正である場合、ロボットは停止する。(c) 車輪のいずれかが2秒を超えて継続的に脱輪した場合、ロボットは停止する。(d) 脱輪事象が短時間で何度も発生した場合、ロボットは停止する。(e) 絶壁センサのいずれかが10秒間継続して絶壁を検出した場合、ロボットは停止する。(f) 衝突センサが、ある時間(例えば10秒間)押下され続けた場合、ロボットが食い込んでいることが多いので、ロボットは停止する。

30

【0081】

説明用の例として、図12A及び図12Bに、上記の状況1、状況2、及び状況4で上述したように失速したブラシモータに関する脱出行動が必要であることを識別する好適な実施形態で用いられる解析を示す。ブラシの電流がブラシモータの所与の限界を超える(ステップ402)度に、率レジスタが1つづつインクリメントされる(ステップ404)。限界が検出されなければ、率レジスタは1つづつデクリメントされる(ステップ406)。個々の変化率レジスタは、120サイクルといった直近の時刻での直近の値を格納する。失速率が600(600は、1秒間の継続的な失速に対応する)を超えていて(ステップ414)、変化率が正である(ステップ416)場合、脱出行動が可能(ステップ418)であれば、ロボットは脱出行動を実行する(ステップ420)。実行後、失速率が0に戻るまで(ステップ422)脱出行動は禁止され(ステップ428)、再び可能とされ(ステップ424)、そして再度600に上昇する。これは、失速率が600を超えていると常に脱出行動が起動されてしまうということを、防止するためになされる。

40

【0082】

しかしながら、失速率が2400を超え(ステップ410)、変化率が正であると(ステップ412)、ロボットは、図12Bに示すように、脱出行動の特殊な組を実行することになる。好適な実施形態では、ブラシモータがオフになり(ステップ430)、「レベル」が所定量(50乃至90)だけインクリメントされ(ステップ430)、失速時間が設定され(ステップ430)、ブラシがオフになってから、パニック行動(ステップ452)は1秒(ステップ445)、4秒(ステップ450)、および7秒(ステップ455)

50

経過時に実行される。そして、制御システムは、ブラシを13秒経過後に再始動する（ステップ440，442）。レベルは、毎秒1ずつデクリメントされてゆく（ステップ444）。レベルが最大の閾値に達すると（ステップ435）、ロボットは全ての動作を停止する（ステップ437）。さらに、モータの損傷を防ぐためにモータの電圧を制限する等のある種の失速が検出されると、ロボットは追加の動作を行う。

#### 【0083】

ロボットの好適な実施形態は、4つの脱出行動を有する。すなわち、回転（TURN）、縁端（EDGE）、脱輪（WHEEL DROP）、及び低速度（SLOW）である。

#### 【0084】

〔回転〕ロボットは、その場でランダムな方向へと回転する。なお、この回転は、高速（通常の回転速度の約2倍）で開始し、低速（通常の回転速度の約1/2）になるまで減速される。速度を変化させることにより、ロボットが様々な状況から脱出するのを助けられことがある。ロボットが回転すべき角度は、ランダムであってもよく、脱出の必要性の度合いの関数であってもよく、これらの双方であってもよい。好適な実施形態において、パニック度の低い状況では、ロボットは45°乃至90°のどこかまで回転し、パニック度の高い状況では、ロボットは90°乃至270°のどこかまで回転する。10

#### 【0085】

〔縁端〕ロボットは、（a）衝突せずに60°回転するか、（b）縁端行動が開始されてから合計で170°を超えて回転するまで、衝突センサを用いて縁端を辿って行く。縁端行動は、平均の衝突距離が短い（但しパニック行動を起こす程には短くない）ときに有用になることがある。縁端行動により、ロボットは、該ロボットにとって物理的に可能な最も小さな開口をすり抜けることが可能となり、それで、ロボットは限定された領域から脱出できる。20

#### 【0086】

〔脱輪〕ロボットは車輪を短時間逆方向に駆動してから、停止させる。車輪を逆方向に駆動すると、車輪を反対側に突き動かすことにより、間違った正の脱輪を最小限とするのに役立つ。脱輪が2秒以内に解消すると、ロボットは通常の動作を継続する。

#### 【0087】

〔低速度〕脱輪又は絶壁検出器がオフになると、ロボットは、0.5mの距離に亘って速度を0.235m/s（あるいは通常速度の77%）まで落してから、通常の速度に復帰する。30

#### 【0088】

処理行動及び脱出行動に加えて、ロボットは、安全性や有用性に関する追加の動作を含んでいてもよい。例えば、所定時間を超えて絶壁が検出された場合、ロボットは停止する。絶壁が最初に検出されたとき、絶壁回避反応行動が、直ちに、あらゆる他の行動に対して優先し、ロボットが絶壁を検出しなくなるまで、該ロボットを絶壁から迂回させる。好適な実施形態では、絶壁検出事象によっては、動作モードは変わらない。他の実施形態では、ロボットは、壁面追従行動に類似したアルゴリズムを用いて、絶壁の追従が可能であってもよい。

#### 【0089】

以上、3つの動作モードにおける個々の動作を説明した。次に、我々は、様々なモード間の切替の好適なモードについて説明する。40

#### 【0090】

最適な処理及び清掃効率を達成するために、好適な実施形態では、様々な処理動作に優先度を与える制御プログラムが用いられる。（必要であれば、脱出行動に常に高い優先度が与えられる。）例えば、ロボット10は、特定の時間又はランダムな時間、壁面追従モードを用いて、その後、動作モードを室内清掃に切り替えてよい。動作モードを切り替えることにより、本発明のロボット装置は、処理範囲、清掃効率、及び知覚効率を向上させることができる。

#### 【0091】

例として、図13A及び図13Bに、「犬の骨」形状の環境中の移動ロボット10を示す。この環境では、ほぼ同じ寸法の2つの部屋115, 116が、狭い通路105でつながっている。(この例は、先に検討したロボット拡散問題を示している。)この配置は、典型的な室内環境を単純化したものである。ここで、「犬の骨」は、室内の障害物の配置により発生していてもよい。図13Aでは、ロボット10の通路は、ロボット10がランダムな反跳モードで動作したことにして、線54として辿られる。限定された走行では、ロボット10は、部屋116から部屋115へと移動できない。これは、ロボットのランダムな行動により、そのロボットが通路105を通過するように導かれるということが、起こらないためである。この方法では、処理範囲が最適なものよりもはるかに狭くなり、ロボット10が自分の経路に何度も交差することで、清掃速度が低下してしまう。

10

#### 【0092】

図13Bに、ロボット10の好適な実施形態の動作を示す。ここで、ロボットは、反跳動作と壁面追従動作とを交互に繰り返す。ロボット10は、経路99を辿りながら、壁100に遭遇するたびに、ロボットの直径の2倍に等しい距離だけ壁面に追従している。経路99において、ロボットが壁面追従モードで動作している部分には、符号51が付されている。この方法により、処理範囲が非常に拡がり、それに伴って、清掃速度及び知覚効率も向上している。

#### 【0093】

最後に、本発明の好適な実施形態を図14に詳細に示す。この図では、全ての動作モードが使用されている。好適な実施形態では、清掃機10は、螺旋モードで始動する(移動線45)。反射螺旋パターンが用いられる場合、清掃機は、所定の回数又はランダムな回数だけ反射事象が起こるまで、螺旋モードを継続する。通常の螺旋が用いられる場合(図14に示すように)、清掃機は、衝突センサの事象が起こるまで継続することになる。好適な実施形態では、きっかけとなる事象が起こると、直ちに、清掃機は壁面追従モードに入る。

20

#### 【0094】

そして、好適な実施形態では、清掃機は、衝突センサ事象に基づき、あるいは壁面追従アルゴリズムの完了に基づいて、壁面追従モード(移動線51)とランダムな反跳モード(動作線48)との間を切り替える。ある実施形態では、清掃機は、螺旋モードには回帰しない。一方、他の実施形態では、清掃機は、所定の事象又はランダムな事象に基づいて、螺旋モードに入ることがある。

30

#### 【0095】

好適な実施形態では、ロボットは、衝突と衝突との間の平均移動距離を記録し続けている。そして、ロボットは、以下の式： $((3/4) \times ABD) + ((1/4) \times (\text{最新の衝突間距離}))$ を用いて、平均衝突距離(ABD)を算出する。ABDが所定の閾値を超えた場合、ロボットは、再び螺旋行動に優先権を与える。さらに別の実施形態では、ロボットは、螺旋駆動に再び優先権が与えられる前に、最低限の回数の衝突事象をもってもよい。他の実施形態では、ロボットは、例えば20フィートの最大距離を移動した場合に、衝突事象がなくとも、螺旋行動に入つてもよい。

30

#### 【0096】

また、ロボットは、全ての動作を停止する状況を有していてもよい。例えば、マニュアルで選択可能な所望の室内の大きさで、最小及び最大走行時間が設定され、最小合計距離が選択される。最小時間及び最小距離に達すると、ロボットは停止する。同様に、最大時間に達するとロボットは停止する。

40

#### 【0097】

無論、動作モード間の選択のためのマニュアル制御が、用いられてもよい。例えば、動作モードや行動を変更したりこれらに影響を与えたりするために、リモートコントロールが用いられてもよい。同様に、ケースに取付けられたスイッチ自体が、動作モードの設定やモード間の切替に用いられてもよい。例えば、室内の雑然度を設定するスイッチが用いられてもよい。これにより、ロボットにおいて、限定された検出能力で、より適切な処理ア

50

ルゴリズムが可能となる。

【0098】

本発明そのものの一部が、清掃の他にも様々な目的のための自律型車両に用いられてもよいことが、当業者には理解されるであろう。本発明の範囲は、与えられた実施例によってではなく、特許請求の範囲に記載の請求項及びそれの法的に等価なものにより規定されるべきである。

【図面の簡単な説明】

【図1A】

従来例における様々なロボットの処理パターンを示す図である。

【図1B】

従来例における様々なロボットの処理パターンを示す図である。

【図1C】

従来例における様々なロボットの処理パターンを示す図である。

【図1D】

従来例における様々なロボットの処理パターンを示す図である。

【図2】

本発明の好適な実施形態で用いられる移動ロボットの基本的な構成要素の模式的な平面図である。

【図3】

図2に示すロボットのハードウェアブロック図である。

【図4A】

ロボットが障害物に遭遇した角度を決定する方法を示す図である。

【図4B】

ロボット制御システムの好適な実施形態の方位を示す図である。

【図5】

本発明のそのままの動作モードを示す模式図である。

【図6A】

螺旋行動の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図6B】

螺旋行動の別の実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図6C】

螺旋行動のさらに別の実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図7】

本発明の好適な実施形態のスポット処理アルゴリズムを示すフローチャートである。

【図8A】

障害物追従モードにおける動作の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図8B】

障害物追従モードにおける動作の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図9A】

本発明の好適な実施形態の障害物追従アルゴリズムを示すフローチャートである。

【図9B】

障害物追従モードから離脱する場合を決定する好適なアルゴリズムを示すフローチャートである。

【図10】

反跳行動の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図11】

本発明の好適な実施形態の室内処理アルゴリズムを示すフローチャートである。

【図12A】

脱出行動の例を示すフローチャートである。

【図12B】

10

20

30

40

50

脱出行動の例を示すフロー・チャートである。

【図13A】

単一の動作モードのみの移動ロボットの処理パターンを示す模式図である。

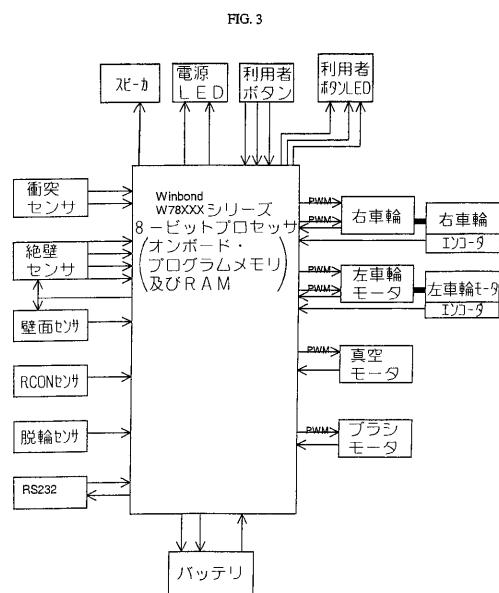
【図13B】

障害物追従モード及び室内処理モードを用いた本発明の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

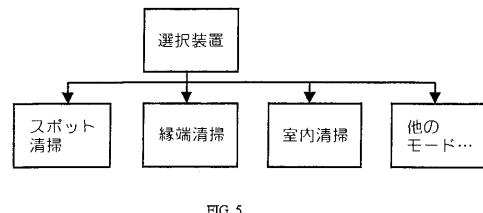
【図14】

スポット処理、障害物追従、及び室内処理モードを用いた本発明の好適な実施形態の処理パターンを示す模式図である。

【図3】



【図5】



【図7】

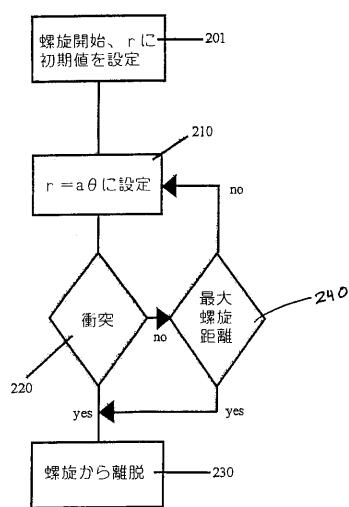


FIG. 7

【図9A】

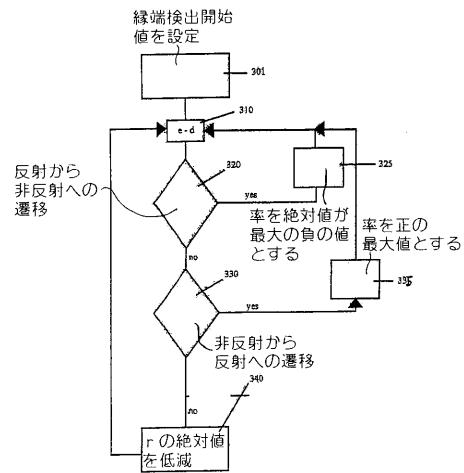


FIG. 9A

【図9B】

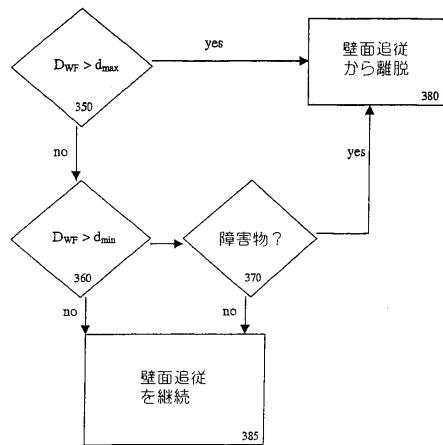


FIG. 9B

【図10】

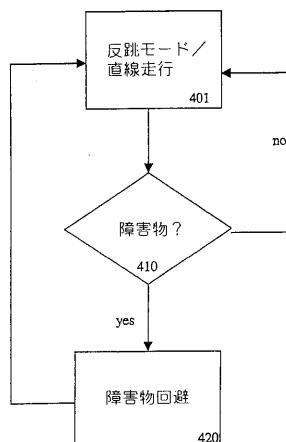


FIG. 10

【図12A】

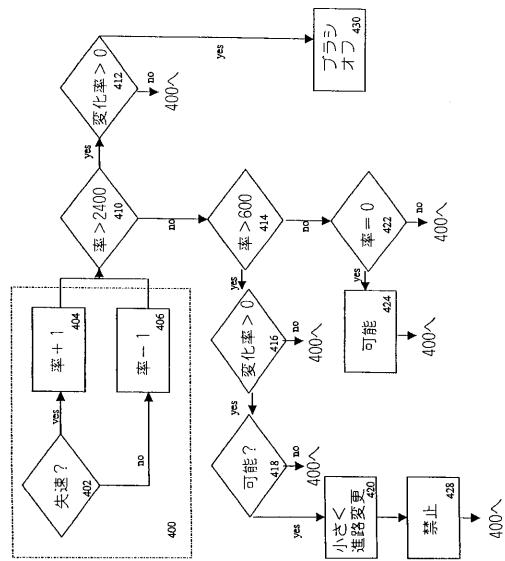


FIG. 12A

【図12B】

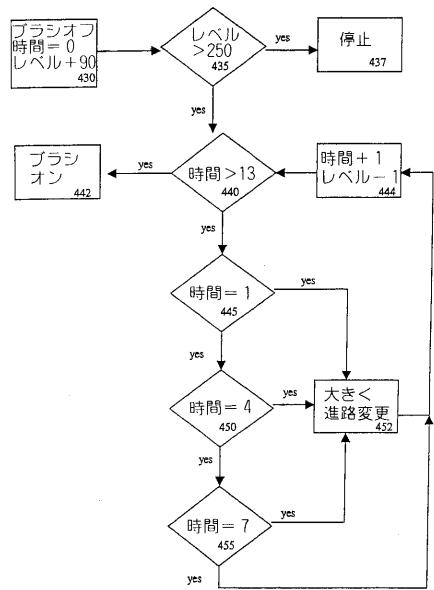


FIG. 12B

## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
19 December 2002 (19.12.2002)

PCT

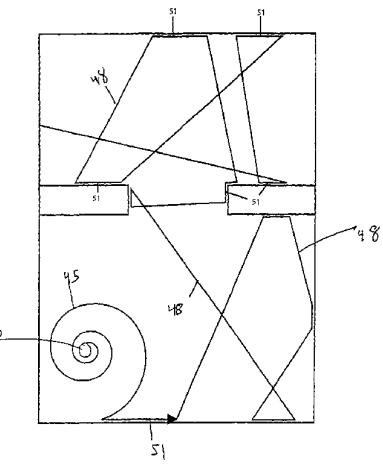
(10) International Publication Number  
WO 02/101477 A2

- (51) International Patent Classification<sup>1</sup>: G05D 1/00 MASS, Philip, R. [US/US]; 28 Fleet Street, #12, Boston, MA 02113 (US).
- (21) International Application Number: PCT/US02/18450
- (22) International Filing Date: 12 June 2002 (12.06.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 60/297,718 12 June 2001 (12.06.2001) US
- (71) Applicant (for all designated States except US): iROBOT CORPORATION [US/US]; Twin City Office Center, Suite 6, 22 McGrath Highway, Somerville, MA 02143 (US).
- (72) Inventors; and
- (75) Inventors/Applicants (for US only): JONES, Joseph [US/US]; 9 Redwood Road, Acton, MA 01720 (US).
- (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EL, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, L, C, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TI, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KB, LS, MW, MZ, SD, SI, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CL, CY, DE, DK, ES, FI, FR,

*[Continued on next page]*

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR MULTI-MODE COVERAGE FOR AN AUTONOMOUS ROBOT

WO 02/101477 A2



---

**WO 02/101477 A2**

GB, GR, IL, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent  
(BH, BJ, CI, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR,  
ND, SN, TD, TG).

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

**Published:**

— without international search report and to be republished  
upon receipt of that report

WO 02/101477

PCT/US02/18450

5 PCT APPLICATION  
(US Receiving Office)

10

**Application for Patent Under the Patent Cooperation Treaty:**

15

# METHOD AND SYSTEM FOR MULTI-MODE COVERAGE FOR AN AUTONOMOUS ROBOT

20

25

30

WO 02/101477

PCT/US02/18450

**METHOD AND SYSTEM FOR MULTI-MODE COVERAGE FOR AN  
AUTONOMOUS ROBOT**

5

**CITATION OF PROVISIONAL APPLICATION**

This PCT application claims priority to U.S. provisional application for patent Serial Number 60/297,718 filed June 12, 2001.

**FIELD OF THE INVENTION**

10 This invention relates generally to autonomous vehicles or robots, and more specifically to methods and mobile robotic devices for covering a specific area as might be required of, or used as, robotic cleaners or lawn mowers.

**BACKGROUND**

15 For purposes of this description, examples will focus on the problems faced in the prior art as related to robotic cleaning (e.g., dusting, buffing, sweeping, scrubbing, dry mopping or vacuuming). The claimed invention, however, is limited only by the claims themselves, and one of skill in the art will recognize the myriad of uses for the present invention beyond indoor, domestic cleaning.

20 Robotic engineers have long worked on developing an effective method of autonomous cleaning. By way of introduction, the performance of cleaning robots should concentrate on three measures of success: coverage, cleaning rate and perceived effectiveness. Coverage is the percentage of the available space visited by the robot during a fixed cleaning time, and ideally, a robot cleaner would provide 25 100 percent coverage given an infinite run time. Unfortunately, designs in the prior art often leave portions of the area uncovered regardless of the amount of time the device is allowed to complete its tasks. Failure to achieve complete coverage can result from mechanical limitations -- e.g., the size and shape of the robot may prevent it from reaching certain areas -- or the robot may become trapped, unable to vary its 30 control to escape. Failure to achieve complete coverage can also result from an inadequate coverage algorithm. The coverage algorithm is the set of instructions used by the robot to control its movement. For the purposes of the present invention,

WO 02/101477

PCT/US02/18450

coverage is discussed as a percentage of the available area visited by the robot during a finite cleaning time. Due to mechanical and/or algorithmic limitations, certain areas within the available space may be systematically neglected. Such systematic neglect is a significant limitation in the prior art.

- 5       A second measure of a cleaning robot's performance is the cleaning rate given in units of area cleaned per unit time. Cleaning rate refers to the rate at which the area of cleaned floor increases; coverage rate refers to the rate at which the robot covers the floor regardless of whether the floor was previously clean or dirty. If the velocity of the robot is  $v$  and the width of the robot's cleaning mechanism (also  
10      called work width) is  $w$  then the robot's coverage rate is simply  $wv$ , but its cleaning rate may be drastically lower.

A robot that moves in a purely randomly fashion in a closed environment has a cleaning rate that decreases relative to the robot's coverage rate as a function of time. This is because the longer the robot operates the more likely it is to revisit  
15      already cleaned areas. The optimal design has a cleaning rate equivalent to the coverage rate, thus minimizing unnecessary repeated cleanings of the same spot. In other words, the ratio of cleaning rate to coverage rate is a measure of efficiency and an optimal cleaning rate would mean coverage of the greatest percentage of the designated area with the minimum number of cumulative or redundant passes over  
20      an area already cleaned.

A third metric of cleaning robot performance is the perceived effectiveness of the robot. This measure is ignored in the prior art. Deliberate movement and certain patterned movement is favored as users will perceive a robot that contains deliberate movement as more effective.

- 25       While coverage, cleaning rate and perceived effectiveness are the performance criteria discussed herein, a preferred embodiment of the present invention also takes into account the ease of use in rooms of a variety of shapes and sizes (containing a variety of unknown obstacles) and the cost of the robotic components. Other design criteria may also influence the design, for example the  
30      need for collision avoidance and appropriate response to other hazards.

As described in detail in Jones, Flynn & Seiger, Mobile Robots: Inspiration to Implementation second edition, 1999, A K Peters, Ltd., and elsewhere, numerous

WO 02/101477

PCT/US02/18450

attempts have been made to build vacuuming and cleaning robots. Each of these robots has faced a similar challenge: how to efficiently cover the designated area given limited energy reserves.

- We refer to maximally efficient cleaning, where the cleaning rate equals the coverage rate, as deterministic cleaning. As shown in FIG. 1A, a robot 1 following a deterministic path moves in such a way as to completely cover the area 2 while avoiding all redundant cleaning. Deterministic cleaning requires that the robot know both where it is and where it has been; this in turn requires a positioning system. Such a positioning system – a positioning system suitably accurate to enable deterministic cleaning might rely on scanning laser rangers, ultrasonic transducers, carrier phase differential GPS, or other methods – can be prohibitively expensive and involve user set-up specific to the particular room geometries. Also, methods that rely on global positioning are typically incapacitated by the failure of any part of the positioning system.
- One example of using highly sophisticated (and expensive) sensor technologies to create deterministic cleaning is the RoboScrub device built by Denning Mobile Robotics and Windsor Industries, which used sonar, infrared detectors, bump sensors and high-precision laser navigation. RoboScrub's navigation system required attaching large bar code targets at various positions in the room.
- The requirement that RoboScrub be able to see at least four targets simultaneously was a significant operational problem. RoboScrub, therefore, was limited to cleaning large open areas.

- Another example, RoboKent, a robot built by the Kent Corporation, follows a global positioning strategy similar to RobotScrub. RoboKent dispenses with RobotScrub's more expensive laser positioning system but having done so RoboKent must restrict itself only to areas with a simple rectangular geometry, e.g. long hallways. In these more constrained regions, position correction by sonar ranging measurements is sufficient. Other deterministic cleaning systems are described, for example, in U.S. Patent Nos. 4,119,900 (Kremnitz), 4,700,427 (Knepper), 5,353,224 (Lee et al.), 5,537,017 (Feiten et al.), 5,548,511 (Bancroft), 5,650,702 (Azumi).

Because of the limitations and difficulties of deterministic cleaning, some robots have relied on pseudo-deterministic schemes. One method of providing

WO 02/101477

PCT/US02/18450

- pseudo-deterministic cleaning is an autonomous navigation method known as dead reckoning. Dead reckoning consists of measuring the precise rotation of each robot drive wheel (using for example optical shaft encoders). The robot can then calculate its expected position in the environment given a known starting point and orientation.
- 5 One problem with this technique is wheel slippage. If slippage occurs, the encoder on that wheel registers a wheel rotation even though that wheel is not driving the robot relative to the ground. As shown in FIG. 1B, as the robot 1 navigates about the room, these drive wheel slippage errors accumulate making this type of system unreliable for runs of any substantial duration. (The path no longer consists of
- 10 tightly packed rows, as compared to the deterministic coverage shown in FIG. 1A.) The result of reliance on dead reckoning is intractable systematic neglect; in other words, areas of the floor are not cleaned.

One example of a pseudo-deterministic system is the Cye robot from Probotics, Inc. Cye depends exclusively on dead reckoning and therefore takes heroic measures to maximize the performance of its dead reckoning system. Cye must begin at a user-installed physical registration spot in a known location where the robot fixes its position and orientation. Cye then keeps track of position as it moves away from that spot. As Cye moves, uncertainty in its position and orientation increase. Cye must make certain to return to a calibration spot before this error grows so large that it will be unlikely to locate a calibration spot. If a calibration spot is moved or blocked or if excessive wheel slippage occurs then Cye can become lost (possibly without realizing that it is lost). Thus Cye is suitable for use only in relatively small benign environments. Other examples of this approach are disclosed in U.S. Patent Nos. 5,109,566 (Kobayashi et al.) and 6,255,793 (Peless et al.).

Another approach to robotic cleaning is purely random motion. As shown in FIG. 1C, in a typical room without obstacles, a random movement algorithm will provide acceptable coverage given significant cleaning time. Compared to a robot with a deterministic algorithm, a random cleaning robot must operate for a longer time to achieve acceptable coverage. To have high confidence that the random-motion robot has cleaned 98% of an obstacle-free room, the random motion robot

WO 02/101477

PCT/US02/18450

must run approximately five times as long as a deterministic robot with the same cleaning mechanism moving at the same speed.

- The coverage limitations of a random algorithm can be seen in FIG. 1D. An obstacle 5 in the room can create the effect of segmenting the room into a collection 5 of chambers. The coverage over time of a random algorithm robot in such a room is analogous to the time density of gas released in one chamber of a confined volume. Initially, the density of gas is highest in the chamber where it is released and lowest in more distant chambers. Similarly the robot is most likely to thoroughly clean the chamber where it starts, rather than more distant chambers, early in the process.
- 10 Given enough time a gas reaches equilibrium with equal density in all chambers. Likewise given time, the robot would clean all areas thoroughly. The limitations of practical power supplies, however, usually guarantee that the robot will have insufficient time to clean all areas of a space cluttered with obstacles. We refer to this phenomenon as the robot diffusion problem.
- 15 As discussed, the commercially available prior art has not been able to produce an effective coverage algorithm for an area of unknown geometry. As noted above, the prior art either has relied on sophisticated systems of markers or beacons or has limited the utility of the robot to rooms with simple rectangular geometries. Attempts to use pseudo-deterministic control algorithms can leave areas of the space 20 systematically neglected.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

It is an object of the present invention to provide a system and method to allow a mobile robot to operate in a plurality of modes in order to effectively cover 25 an area.

It is an object of the present invention to provide a mobile robot, with at least one sensor, to operate in a number of modes including spot-coverage, obstacle following and bounce.

It is a further object of the invention to provide a mobile robot that alternates 30 between obstacle following and bounce mode to ensure coverage.

It is an object of the invention to return to spot-coverage after the robot has traveled a pre-determined distance.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

It is an object of the invention to provide a mobile robot able to track the average distance between obstacles and use the average distance as an input to alternate between operational modes.

It is yet another object of the invention to optimize the distance the robot 5 travels in an obstacle following mode as a function of the frequency of obstacle following and the work width of the robot, and to provide a minimum and maximum distance for operating in obstacle following mode.

It is an object of a preferred embodiment of the invention to use a control system for a mobile robot with an operational system program able to run a plurality 10 of behaviors and using an arbiter to select which behavior is given control over the robot.

It is still another object of the invention to incorporate various escape programs or behavior to allow the robot to avoid becoming stuck.

Finally, it is an object of the invention to provide one or more methods for 15 controlling a mobile robot to benefit from the various objects and advantages disclosed herein.

#### **BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

These and further features of the present invention will be apparent with 20 reference to the accompanying drawings, wherein:

FIGS. 1A-D illustrate coverage patterns of various robots in the prior art;  
FIG. 2 is a top-view schematic representation of the basic components of a

mobile robot used in a preferred embodiment of the invention;

FIG. 3 demonstrates a hardware block diagram of the robot shown in FIG. 2;

FIG. 4A is a diagram showing a method of determining the angle at which the 25 robot encounters an obstacle; FIG. 4B is a diagram showing the orientation of a preferred embodiment of the robot control system;

FIG. 5 is a schematic representation of the operational modes of the instant invention;

FIG. 6A is a schematic representation of the coverage pattern for a preferred 30 embodiment of SPIRAL behavior; FIG. 6B is a schematic representation of the coverage pattern for an alternative embodiment of SPIRAL behavior; FIG. 6C is a

WO 02/101477

PCT/US02/18450

schematic representation of the coverage pattern for yet another alternative embodiment of SPIRAL behavior;

FIG. 7 is a flow-chart illustration of the spot-coverage algorithm of a preferred embodiment of the invention;

5 FIGS. 8A & 8B are schematic representations of the coverage pattern for a preferred embodiment of operation in obstacle following mode;

FIG. 9A is a flow-chart illustration of the obstacle following algorithm of a preferred embodiment of the invention; FIG. 9B is a flow-chart illustration of a preferred algorithm for determining when to exit obstacle following mode.

10 FIG. 10 is a schematic representation of the coverage pattern for a preferred embodiment of BOUNCE behavior;

FIG. 11 is a flow-chart illustration of the room coverage algorithm of a preferred embodiment of the invention;

15 FIGS. 12A & 12B are flow-chart illustrations of an exemplary escape behavior;

FIG. 13A is a schematic representation of the coverage pattern a mobile robot with only a single operational mode; FIG. 13B is a schematic representation of the coverage pattern for a preferred embodiment of the instant invention using obstacle following and room coverage modes; and

20 FIG. 14 is a schematic representation of the coverage pattern for a preferred embodiment of the instant invention using spot-coverage, obstacle following and room coverage modes.

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENT

25 In the present invention, a mobile robot is designed to provide maximum coverage at an effective coverage rate in a room of unknown geometry. In addition, the perceived effectiveness of the robot is enhanced by the inclusion of patterned or deliberate motion. In addition, in a preferred embodiment, effective coverage requires a control system able to prevent the robot from becoming immobilized in an

30 unknown environment.

While the physical structures of mobile robots are known in the art, the components of a preferred, exemplary embodiment of the present invention is

WO 02/101477

PCT/US02/18450

- described herein. A preferred embodiment of the present invention is a substantially circular robotic sweeper containing certain features. As shown in FIG. 2, for example, the mobile robot 10 of a preferred embodiment includes a chassis 11 supporting mechanical and electrical components. These components include
- 5 various sensors, including two bump sensors 12 & 13 located in the forward portion of the robot, four cliff sensors 14 located on the robot shell 15, and a wall following sensor 16 mounted on the robot shell 15. In other embodiments, as few as one sensor may be used in the robot. One of skill in the art will recognize that the sensor(s) may be of a variety of types including sonar, tactile, electromagnetic, capacitive, etc.
- 10 Because of cost restraints, a preferred embodiment of the present invention uses bump (tactile) sensors 12 & 13 and reflective IR proximity sensors for the cliff sensors 14 and the wall-following sensor 16. Details of the IR sensors are described in U.S. Patent Application U.S.S.N. 09/768,773, which disclosure is hereby incorporated by reference.
- 15 A preferred embodiment of the robot also contains two wheels 20, motors 21 for driving the wheels independently, an inexpensive low-end microcontroller 22, and a rechargeable battery 23 or other power source known in the art. These components are well known in the art and are not discussed in detail herein. The robotic cleaning device 10 further includes one or more cleaning heads 30. The
- 20 cleaning head might contain a vacuum cleaner, various brushes, sponges, mops, electrostatic cloths or a combination of various cleaning elements. The embodiment shown in FIG. 2 also includes a side brush 32.
- As mentioned above, a preferred embodiment of the robotic cleaning device
- 10 comprises an outer shell 15 defining a dominant side, non-dominant side, and a
- 25 front portion of the robot 10. The dominant side of the robot is the side that is kept near or in contact with an object (or obstacle) when the robot cleans the area adjacent to that object (or obstacle). In a preferred embodiment, as shown in FIG. 1, the dominant side of the robot 10 is the right-hand side relative to the primary direction of travel, although in other embodiments the dominant side may be the left-hand
- 30 side. In still other embodiments, the robot may be symmetric and thereby does not need a dominant side; however, in a preferred embodiment, a dominant side is

WO 02/101477

PCT/US02/18450

chosen for reasons of cost. The primary direction of travel is as shown in FIG. 2 by arrow 40.

In a preferred embodiment, two bump sensors 12 & 13 are located forward of the wheels 20 relative to the direction of forward movement, shown by arrow 40.

- 5 One bump sensor 13 is located on the dominant side of the robot 10 and the other bump sensor 12 is located on the non-dominant side of the robot 10. When both of these bump sensors 12 & 13 are activated simultaneously, the robot 10 recognizes an obstacle in the front position. In other embodiments, more or fewer individual bump sensors can be used. Likewise, any number of bump sensors can be used to divide
- 10 the device into any number of radial segments. While in a preferred embodiment the bump sensors 12 & 13 are IR break-beam sensors activated by contact between the robot 10 and an obstacle, other types of sensors can be used, including mechanical switches and capacitive sensors that detect the capacitance of objects touching the robot or between two metal plates in the bumper that are compressed on contact.
- 15 Non-contact sensors, which allow the robot to sense proximity to objects without physically touching the object, such as capacitive sensors or a curtain of IR light, can also be used.

It is useful to have a sensor or sensors that are not only able to tell if a surface has been contacted (or is nearby), but also the angle relative to the robot at which the contact was made. In the case of a preferred embodiment, the robot is able to calculate the time between the activation of the right and left bump switches 12 & 13, if both are activated. The robot is then able to estimate the angle at which contact was made. In a preferred embodiment shown in FIG. 4A, the bump sensor comprises a single mechanical bumper 44 at the front of the robot with sensors 42 & 43 substantially at the two ends of the bumper that sense the movement of the bumper. When the bumper is compressed, the timing between the sensor events is used to calculate the approximate angle at which the robot contacted the obstacle. When the bumper is compressed from the right side, the right bump sensor detects the bump first, followed by the left bump sensor, due to the compliance of the bumper and the

20

25

30

- bump detector geometry. This way, the bump angle can be approximated with only two bump sensors.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

For example, in FIG. 4A, bump sensors 42 & 43 are able to divide the forward portion of the robot into six regions (I-VI). When a bump sensor is activated, the robot calculates the time before the other sensor is activated (if at all). For example, when the right bump sensor 43 is activated, the robot measures the time

5 (t) before the left bump sensor 42 is activated. If t is less than  $t_1$ , then the robot assumes contact occurred in region IV. If t is greater than or equal to  $t_1$  and less than  $t_2$ , then the robot assumes contact was made in region V. If t is greater than or equal to  $t_2$  (including the case of where the left bump sensor 42 is not activated at all within the time monitored), then the robot assumes the contact occurred in region VI. If the

10 bump sensors are activated simultaneously, the robot assumes the contact was made from straight ahead. This method can be used to divide the bumper into an arbitrarily large number of regions (for greater precision) depending on the timing used and geometry of the bumper. As an extension, three sensors can be used to calculate the bump angle in three dimensions instead of just two dimensions as in the

15 preceding example.

A preferred embodiment also contains a wall-following or wall-detecting sensor 16 mounted on the dominant side of the robot 10. In a preferred embodiment, the wall following sensor is an IR sensor composed of an emitter and detector pair collimated so that a finite volume of intersection occurs at the expected position of

20 the wall. This focus point is approximately three inches ahead of the drive wheel in the direction of robot forward motion. The radial range of wall detection is about 0.75 inches.

A preferred embodiment also contains any number of IR cliff sensors 14 that prevent the device from tumbling over stairs or other vertical drops. These cliff

25 sensors are of a construction similar to that of the wall following sensor but directed to observe the floor rather than a wall. As an additional safety and sensing measure, the robot 10 includes a wheel-drop sensor that is able to detect if one or more wheels is unsupported by the floor. This wheel-drop sensor can therefore detect not only cliffs but also various obstacles upon which the robot is able to drive, such as lamps

30 bases, high floor transitions, piles of cords, etc.

Other embodiments may use other known sensors or combinations of sensors.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

FIG. 3 shows a hardware block diagram of the controller and robot of a preferred embodiment of the invention. In a preferred embodiment, a Winbond W78XXX series processor is used. It is a microcontroller compatible with the MCS-51 family with 36 general purpose I/O ports, 256 bytes of RAM and 16K of ROM. It  
5 is clocked at 40MHz which is divided down for a processor speed of 3.3 MHz. It has two timers which are used for triggering interrupts used to process sensors and generate output signals as well as a watchdog timer. The lowest bits of the fast timer are also used as approximate random numbers where needed in the behaviors. There  
10 are also two external interrupts which are used to capture the encoder inputs from the two drive wheels. The processor also has a UART which is used for testing and debugging the robot control program.

The I/O ports of the microprocessor are connected to the sensors and motors of the robot and are the interface connecting it to the internal state of the robot and its environment. For example, the wheel drop sensors are connected to an input port  
15 and the brush motor PWM signal is generated on an output port. The ROM on the microprocessor is used to store the coverage and control program for the robot. This includes the behaviors (discussed below), sensor processing algorithms and signal generation. The RAM is used to store the active state of the robot, such as the average bump distance, run time and distance, and the ID of the behavior in control  
20 and its current motor commands.

For purposes of understanding the movement of the robotic device, FIG. 4B shows the orientation of the robot 10 centered about the x and y axes in a coordinate plane; this coordinate system is attached to the robot. The directional movement of the robot 10 can be understood to be the radius at which the robot 10 will move. In  
25 order to rapidly turn away from the wall 100, the robot 10 should set a positive, small value of r ( $r_3$  in FIG. 4B); in order to rapidly turn toward the wall, the robot should set a negative, small value of r ( $r_1$  in FIG. 4B). On the other hand, to make slight turns, the robot should set larger absolute values for r – positive values to move left (i.e. away from the wall,  $r_4$  in FIG. 4B) and negative values to move right (i.e., toward  
30 the wall,  $r_2$  in FIG. 4B). This coordinate scheme is used in the examples of control discussed below. The microcontroller 22 controlling differential speed at which the individual wheel motors 21 are run, determines the turning radius.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

Also, in certain embodiments, the robot may include one or more user inputs. For example, as shown in FIG. 2, a preferred embodiment includes three simple buttons 33 that allow the user to input the approximate size of the surface to be covered. In a preferred embodiment, these buttons labeled "small," "medium," and 5 "large" correspond respectively to rooms of 11.1, 20.8 and 27.9 square meters.

As mentioned above, the exemplary robot is a preferred embodiment for practicing the instant invention, and one of skill in the art is able to choose from elements known in the art to design a robot for a particular purpose. Examples of suitable designs include those described in the following U.S. Patents Nos:

10 4,306,329 (Yokoi), 5,109,566 (Kobayashi et al.), 5,293,955 (Lee), 5,369,347 (Yoo),  
5,440,216 (Kim), 5,534,762 (Kim), 5,613,261 (Kawakami et al.), 5,634,237  
(Paranjpe), 5,781,960 (Kilstrom et al.), 5,787,545 (Colens), 5,815,880 (Nakanishi),  
5,839,156 (Park et al.), 5,926,909 (McGee), 6,038,501 (Kawakami), 6,076,226  
(Reed), all of which are hereby incorporated by reference.

15 FIG. 5 shows a simple block representation of the various operational modes of a device. In a preferred embodiment, and by way of example only, operational modes may include spot cleaning (where the user or robot designates a specific region for cleaning), edge cleaning, and room cleaning. Each operational mode comprises complex combinations of instructions and/or internal behaviors, discussed 20 below. These complexities, however, are generally hidden from the user. In one embodiment, the user can select the particular operational mode by using an input element, for example, a selector switch or push button. In other preferred embodiments, as described below, the robot is able to autonomously cycle through the operational modes.

25 The coverage robot of the instant invention uses these various operational modes to effectively cover the area. While one of skill in the art may implement these various operational modes in a variety of known architectures, a preferred embodiment relies on behavior control. Here, behaviors are simply layers of control systems that all run in parallel. The microcontroller 22 then runs a prioritized 30 arbitration scheme to resolve the dominant behavior for a given scenario. A description of behavior control can be found in *Mobile Robots, supra*, the text of which is hereby incorporated by reference.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

value of  $r$  is set at its minimum, positive value (which will produce the tightest possible counterclockwise turn), the spiraling behavior recalculates the value of  $r$  as a function of  $\theta$ , where  $\theta$  represents the angular turning since the initiation of the spiraling behavior (step 210). By using the equation  $r = a\theta$ , where  $a$  is a constant coefficient, the tightness or desired overlap of the spiral can be controlled. (Note that  $\theta$  is not normalized to  $2\pi$ ). The value of  $a$  can be chosen by the equation  $a = \frac{d}{2\pi}$ ; where  $d$  is the distance between two consecutive passes of the spiral. For effective cleaning, a value for  $d$  should be chosen that is less than the width of the cleaning mechanism 30. In a preferred embodiment, a value of  $d$  is selected that is between one-half and two-thirds of the width of the cleaning head 30.

In other embodiments, the robot tracks its total distance traveled in spiral mode. Because the spiral will deteriorate after some distance, *i.e.* the centerpoint of the spiral motion will tend to drift over time due to surface dependant wheel slippage and/or inaccuracies in the spiral approximation algorithm and calculation precision. In certain embodiments, the robot may exit spiral mode after the robot has traveled a specific distance ("maximum spiral distance"), such as 6.3 or 18.5 meters (step 240). In a preferred embodiment, the robot uses multiple maximum spiral distances depending on whether the robot is performing an initial spiral or a later spiral. If the maximum spiral distance is reached without a bump, the robot gives control to a different behavior, and the robot, for example, then continues to move in a predominately straight line. (In a preferred embodiment, a STRAIGHT LINE behavior is a low priority, default behavior that propels the robot in an approximate straight line at a preset velocity of approximately 0.306 m/s when no other behaviors are active.

In spiral mode, various actions can be taken when an obstacle is encountered. For example, the robot could (a) seek to avoid the obstacle and continue the spiral in the counter-clockwise direction, (b) seek to avoid the obstacle and continue the spiral in the opposite direction (*e.g.* changing from counter-clockwise to clockwise), or (c) change operational modes. Continuing the spiral in the opposite direction is known as reflective spiraling and is represented in FIG. 6C, where the robot 10 reverses its movement path 45 when it comes into contact with obstacle 101. In a preferred

WO 02/101477

PCT/US02/18450

In other words, in a preferred embodiment, the robot's microprocessor and control software run a number of behaviors simultaneously. Depending on the situation, control of the robot will be given to one or more various behaviors. For purposes of detailing the preferred operation of the present invention, the behaviors 5 will be described as (1) coverage behaviors, (2) escape behaviors or (3) user/safety behaviors. Coverage behaviors are primarily designed to allow the robot to perform its coverage operation in an efficient manner. Escape behaviors are special behaviors that are given priority when one or more sensor inputs suggest that the robot may not be operating freely. As a convention for this specification, behaviors discussed 10 below are written in all capital letters.

1. Coverage Behaviors

FIGS. 6-14 show the details of each of the preferred operational modes: Spot Coverage, Wall Follow (or Obstacle Follow) and Room Coverage.

Operational Mode: Spot Coverage

15 Spot coverage or, for example, spot cleaning allows the user to clean an isolated dirty area. The user places the robot 10 on the floor near the center of the area that requires cleaning and selects the spot-cleaning operational mode. The robot then moves in such a way that the immediate area within, for example, a defined radius, is brought into contact with the cleaning head 30 or side brush 32 of the 20 robot.

In a preferred embodiment, the method of achieving spot cleaning is a control algorithm providing outward spiral movement, or SPIRAL behavior, as shown in FIG. 6A. In general, spiral movement is generated by increasing the turning radius 25 as a function of time. In a preferred embodiment, the robot 10 begins its spiral in a counter-clockwise direction, marked in FIG. 6A by movement line 45, in order to keep the dominant side on the outward, leading-edge of the spiral. In another embodiment, shown in FIG. 6B, spiral movement of the robot 10 is generated inward such that the radius of the turns continues to decrease. The inward spiral is shown as movement line 45 in FIG. 6B. It is not necessary, however, to keep the dominant 30 side of the robot on the outside during spiral motion.

The method of spot cleaning used in a preferred embodiment – outward spiraling – is set forth in FIG. 7. Once the spiraling is initiated (step 201) and the

WO 02/101477

PCT/US02/18450

embodiment, as detailed in step 220, the robot 10 exits spot cleaning mode upon the first obstacle encountered by a bump sensor 12 or 13.

While a preferred embodiment describes a spiral motion for spot coverage, any self-bounded area can be used, including but not limited to regular polygon

- 5 shapes such as squares, hexagons, ellipses, etc.

Operational Mode: Wall/Obstacle Following

Wall following or, in the case of a cleaning robot, edge cleaning, allows the user to clean only the edges of a room or the edges of objects within a room. The user places the robot 10 on the floor near an edge to be cleaned and selects the edge-  
10 clearing operational mode. The robot 10 then moves in such a way that it follows the edge and cleans all areas brought into contact with the cleaning head 30 of the robot.

The movement of the robot 10 in a room 110 is shown in FIG. 8. In FIG. 8A, the robot 10 is placed along with wall 100, with the robot's dominant side next to the  
15 wall. The robot then runs along the wall indefinitely following movement path 46. Similarly, in FIG. 8B, the robot 10 is placed in the proximity of an obstacle 101. The robot then follows the edge of the obstacle 101 indefinitely following movement path 47.

In a preferred embodiment, in the wall-following mode, the robot uses the  
20 wall-following sensor 16 to position itself a set distance from the wall. The robot then proceeds to travel along the perimeter of the wall. As shown in FIGS. 8A & 8B, in a preferred embodiment, the robot 10 is not able to distinguish between a wall 100 and another solid obstacle 101.

The method used in a preferred embodiment for following the wall is detailed  
25 in FIG. 9A and provides a smooth wall following operation even with a one-bit sensor. (Here the one-bit sensor detects only the presence of absence of the wall within a particular volume rather than the distance between wall and sensor.) Other methods of detecting a wall or object can be used such as bump sensing or sonar sensors.

30 Once the wall-following operational mode, or WALL FOLLOWING behavior of a preferred embodiment, is initiated (step 301), the robot first sets its initial value for the steering at  $r_0$ . The WALL-FOLLOWING behavior then initiates

WO 02/101477

PCT/US02/18450

the emit-detect routine in the wall-follower sensor 16 (step 310). The existence of a reflection for the IR transmitter portion of the sensor 16 translates into the existence of an object within a predetermined distance from the sensor 16. The WALL-FOLLOWING behavior then determines whether there has been a transition from a reflection (object within range) to a non-reflection (object outside of range) (step 320). If there has been a transition (in other words, the wall is now out of range), the value of  $r$  is set to its most negative value and the robot will veer slightly to the right (step 325). The robot then begins the emit-detect sequence again (step 310). If there has not been a transition from a reflection to a non-reflection, the wall-following behavior then determines whether there has been a transition from non-reflection to reflection (step 330). If there has been such a transition, the value of  $r$  is set to its most positive value and the robot will veer slightly left (step 335).

In the absence of either type of transition event, the wall-following behavior reduces the absolute value of  $r$  (step 340) and begins the emit-detect sequence (step 310) anew. By decreasing the absolute value of  $r$ , the robot 10 begins to turn more sharply in whatever direction it is currently heading. In a preferred embodiment, the rate of decreasing the absolute value of  $r$  is a constant rate dependant on the distance traveled.

The wall follower mode can be continued for a predetermined or random time, a predetermined or random distance or until some additional criteria are met (e.g. bump sensor is activated, etc.). In one embodiment, the robot continues to follow the wall indefinitely. In a preferred embodiment, as shown in FIGS. 8C & 8D, minimum and maximum travel distances are determined, whereby the robot will remain in WALL-FOLLOWING behavior until the robot has either traveled the maximum distance (FIG. 8D) or traveled at least the minimum distance and encountered an obstacle (FIG. 8C). This implementation of WALL-FOLLOWING behavior ensures the robot spends an appropriate amount of time in WALL-FOLLOWING behavior as compared to its other operational modes, thereby decreasing systemic neglect and distributing coverage to all areas. By increasing wall following, the robot is able to move in more spaces, but the robot is less efficient at cleaning any one space. In addition, by tending to exit WALL-

WO 02/101477

PCT/US02/18450

FOLLOWING behavior after obstacle detection, the robot increases its perceived effectiveness.

- FIG. 9B is a flow-chart illustration showing this embodiment of determining when to exit WALL-FOLLOWING behavior. The robot first determines the minimum distance to follow the wall ( $d_{\min}$ ) and the maximum distance to follow the wall ( $d_{\max}$ ). While in wall (or obstacle) following mode, the control system tracks the distance the robot has traveled in that mode ( $d_{WF}$ ). If  $d_{WF}$  is greater than  $d_{\max}$ (step 350), then the robot exits wall-following mode (step 380). If, however,  $d_{WF}$  is less than  $d_{\max}$ (step 350) and  $d_{WF}$  is less than  $d_{\min}$ (step 360), the robot remains in wall-following mode (step 385). If  $d_{WF}$  is greater than  $d_{\min}$ (step 360) and an obstacle is encountered (step 370), the robot exits wall-following mode (step 380).

- Theoretically, the optimal distance for the robot to travel in WALL-FOLLOWING behavior is a function of room size and configuration and robot size. In a preferred embodiment, the minimum and maximum distances to remain in WALL-FOLLOWING are set based upon the approximate room size, the robots width and a random component, where by the average minimum travel distance is  $2w/p$ , where  $w$  is the width of the work element of the robot and  $p$  is the probability that the robot will enter WALL-FOLLOWING behavior in a given interaction with an obstacle. By way of example, in a preferred embodiment,  $w$  is approximately between 15 cm and 25 cm, and  $p$  is 0.095 (where the robot encounters 6 to 15 obstacles, or an average of 10.5 obstacles, before entering an obstacle following mode). The minimum distance is then set randomly as a distance between approximately 115 cm and 350 cm; the maximum distance is then set randomly as a distance between approximately 170 cm and 520 cm. In certain embodiments the ratio between the minimum distance to the maximum distance is 2:3. For the sake of perceived efficiency, the robot's initial operation in a obstacle following mode can be set to be longer than its later operations in obstacle following mode. In addition, users may place the robot along the longest wall when starting the robot, which improves actual as well as perceived coverage.
- The distance that the robot travels in wall following mode can also be set by the robot depending on the number and frequency of objects encountered (as determined by other sensors), which is a measure of room "clutter." If more objects

WO 02/101477

PCT/US02/18450

are encountered, the robot would wall follow for a greater distance in order to get into all the areas of the floor. Conversely, if few obstacles are encountered, the robot would wall follow less in order to not over-cover the edges of the space in favor of passes through the center of the space. An initial wall-following distance can also 5 be included to allow the robot to follow the wall a longer or shorter distance during its initial period where the WALL-FOLLOWING behavior has control.

In a preferred embodiment, the robot may also leave wall-following mode if the robot turns more than, for example, 270 degrees and is unable to locate the wall (or object) or if the robot has turned a total of 360 degrees since entering wall- 10 following mode.

In certain embodiments, when the WALL-FOLLOWING behavior is active and there is a bump, the ALIGN behavior becomes active. The ALIGN behavior turns the robot counter-clockwise to align the robot with the wall. The robot always turns a minimum angle to avoid getting the robot into cycles of many small 15 turns. After it has turned through its minimum angle, the robot monitors its wall sensor and if it detects a wall and then the wall detection goes away, the robot stops turning. This is because at the end of the wall follower range, the robot is well aligned to start WALL-FOLLOWING. If the robot has not seen its wall detector go on and then off by the time it reaches its maximum angle, it stops anyway. This 20 prevents the robot from turning around in circles when the wall is out of range of its wall sensor. When the most recent bump is within the side 60 degrees of the bumper on the dominant side, the minimum angle is set to 14 degrees and the maximum angle is 19 degrees. Otherwise, if the bump is within 30 degrees of the front of the bumper on the dominant side or on the non-dominant side, the minimum angle is 20 25 degrees and the maximum angle is 44 degrees. When the ALIGN behavior has completed turning, it cedes control to the WALL-FOLLOWING behavior

#### Operational Mode: Room Coverage

The third operational mode is here called room-coverage or room cleaning mode, which allows the user to clean any area bounded by walls, stairs, obstacles or 30 other barriers. To exercise this option, the user places the robot on the floor and selects room-cleaning mode. The robot then moves about the room cleaning all areas that it is able to reach.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

In a preferred embodiment, the method of performing the room cleaning behavior is a BOUNCE behavior in combination with the STRAIGHT LINE behavior. As shown in FIG. 10, the robot 10 travels until a bump sensor 12 and/or 13 is activated by contact with an obstacle 101 or a wall 100. The robot 10 then 5 turns and continues to travel. A sample movement path is shown in FIG. 11 as line 48.

The algorithm for random bounce behavior is set forth in FIG. 10. The robot 10 continues its forward movement (step 401) until a bump sensor 12 and/or 13 is activated (step 410). The robot 10 then calculates an acceptable range of new 10 directions based on a determination of which bump sensor or sensors have been activated (step 420). A determination is then made with some random calculation to choose the new heading within that acceptable range, such as 90 to 270 degrees relative to the object the robot encountered. The angle of the object the robot has bumped is determined as described above using the timing between the right and left 15 bump sensors. The robot then turns to its new headings. In a preferred embodiment, the turn is either clockwise or counterclockwise depending on which direction requires the least movement to achieve the new heading. In other embodiments, the turn is accompanied by movement forward in order to increase the robot's coverage efficiency.

20 The statistics of the heading choice made by the robot can be distributed uniformly across the allowed headings, *i.e.* there is an equivalent chance for any heading within the acceptable range. Alternately we can choose statistics based on a Gaussian or other distribution designed to preferentially drive the robot perpendicularly away from a wall.

25 In other embodiments, the robot could change directions at random or predetermined times and not based upon external sensor activity. Alternatively, the robot could continuously make small angle corrections based on long range sensors to avoid even contacting an object and, thereby cover the surface area with curved paths

30 In a preferred embodiment, the robot stays in room-cleaning mode until a certain number of bounce interactions are reached, usually between 6 and 13.

## 2. Escape Behaviors

WO 02/101477

PCT/US02/18450

There are several situations the robot may encounter while trying to cover an area that prevent or impede it from covering all of the area efficiently. A general class of sensors and behaviors called escape behaviors are designed to get the robot out of these situations, or in extreme cases to shut the robot off if it is determined it cannot escape. In order to decide whether to give an escape behavior priority among the various behaviors on the robot, the robot determines the following: (1) is an escape behavior needed; (2) if yes, which escape behavior is warranted?

By way of example, the following situations illustrate situations where an escape behavior is needed for an indoor cleaning robot and an appropriate behavior to run:

- (i) Situation 1. The robot detects a situation where it might get stuck – for example, a high spot in a carpet or near a lamp base that acts like a ramp for the robot. The robot performs small “panic” turn behaviors to get out of the situation;
- (ii) Situation 2. The robot is physically stuck – for example, the robot is wedged under a couch or against a wall, tangled in cords or carpet tassels, or stuck on a pile of electrical cords with its wheels spinning. The robot performs large panic turn behaviors and turns off relevant motors to escape from the obstruction;
- (iii) Situation 3. The robot is in a small, confined area -- for example, the robot is between the legs of a chair or in the open area under a dresser, or in a small area created by placing a lamp close to the corner of a room. The robot edge follows using its bumper and/or performs panic turn behaviors to escape from the area; and
- (iv) Situation 4. The robot has been stuck and cannot free itself – for example, the robot is in one of the cases in category (ii), above, and has not been able to free itself with any of its panic behaviors. In this case, the robot stops operation and signals to the user for help. This preserves battery life and prevents damage to floors or furniture.

In order to detect the need for each escape situation, various sensors are used. For example:

WO 02/101477

PCT/US02/18450

- (i) Situation 1. (a) When the brush or side brush current rise above a threshold, the voltage applied to the relevant motor is reduced. Whenever this is happening, a stall rate variable is increased. When the current is below the threshold, the stall rate is reduced.
- 5 If the stall level rises above a low threshold and the slope of the rate is positive, the robot performs small panic turn behaviors. It only repeats these small panic turn behaviors when the level has returned to zero and risen to the threshold again. (b) Likewise, there is a wheel drop level variable which is increased when a wheel drop event is detected and is reduced steadily over time. When a wheel drop event is detected and the wheel drop level is above a threshold (meaning there have been several wheel drops recently), the robot performs small or large panic turn behaviors depending on the wheel drop level.
- 10 (ii) Situation 2. (a) When the brush stall rate rises above a high threshold and the slope is positive, the robot turns off the brush for 13 seconds and performs large panic turn behaviors at 1, 3, and 7 seconds. At the end of the 13 seconds, the brush is turned back on. (b) When the drive stall rate rises above a medium threshold and the slope is positive, the robot performs large panic turn behaviors continuously. (c) When the drive stall rate rises above a high threshold, the robot turns off all of the motors for 15 seconds. At the end of the 15 seconds, the motors are turned back on. (d) When the bumper of the robot is held in constantly for 5 seconds (as in a side wedging situation), the robot performs a large panic turn behavior. It repeats the panic turn behavior every 5 seconds until the bumper is released. (e) When the robot has gotten no bumps for a distance of 20 feet, it assumes that it might be stuck with its wheels spinning. To free itself, it performs a spiral. If it has still not gotten a bump for 10 feet after the end of the spiral, performs a large panic turn behavior. It continues this every 10 feet until it gets a bump.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

- 5 (iii) Situation 3. (a) When the average distance between bumps falls below a low threshold, the robot performs edge following using its bumper to try to escape from the confined area. (b) When the average distance between bumps falls below a very low threshold, the robot performs large panic turn behaviors to orient it so that it may better be able to escape from the confined area.

10 (iv) Situation 4. (a) When the brush has stalled and been turned off several times recently and the brush stall rate is high and the slope is positive, the robot shuts off. (b) When the drive has stalled and the motors turned off several times recently and the drive stall rate is high and the slope is positive, the robot shuts off. (c) When any of the wheels are dropped continuously for greater than 2 seconds, the robot shuts off. (d) When many wheel drop events occur in a short time, the robot shuts off. (e) 15 When any of the cliff sensors sense a cliff continuously for 10 seconds, the robot shuts off. (f) When the bump sensor is constantly depressed for a certain amount of time, for example 10 seconds, it is likely that the robot is wedged, and the robot shuts off.

20 As a descriptive example, FIGS. 12A & 12B illustrate the analysis used in a preferred embodiment for identifying the need for an escape behavior relative to a stalled brush motor, as described above in Situations 1, 2 and 4. Each time the brush current exceeds a given limit for the brush motor (step 402), a rate register is incremented by 1 (step 404); if no limit is detected, the rate register is decremented by 1 (step 406). A separate slope register stores the recent values for a recent time period such as 120 cycles. If the rate is above 600 (where 600 corresponds to one second of constant stall) (step 414) and the slope is positive (step 416), then the robot will run an escape behavior (step 420) if the escape behavior is enabled (step 418). The escape behaviors are disabled after running (step 428) until the rate has returned to zero (step 422), re-enabled (step 424) and risen to 600 again. This is done to avoid 25 the escape behavior being triggered constantly at rates above 600.

25

30

WO 02/101477

PCT/US02/18450

If, however, the rate is above 2400 (step 410) and the slope is positive (step 412), the robot will run a special set of escape behaviors, shown in FIG. 12B. In a preferred embodiment, the brush motor will shut off (step 430), the "level" is incremented by a predetermined amount (50 to 90) (step 430), the stall time is set (step 430), and a panic behavior (step 452) is performed at 1 second (step 445), 4 seconds (step 450) and 7 seconds (step 455) since the brush shut off. The control system then restarts the brush at 13 seconds (steps 440 & 442). Level is decremented by 1 every second (steps 444). If level reaches a maximum threshold (step 435), the robot ceases all operation (step 437). In addition, the robot may take additional actions when certain stalls are detected, such as limiting the voltage to the motor to prevent damage to the motor.

A preferred embodiment of the robot has four escape behaviors: TURN, EDGE, WHEEL DROP and SLOW.

TURN. The robot turns in place in a random direction, starting at a higher velocity (approximately twice of its normal turning velocity) and decreasing to a lower velocity (approximately one-half of its normal turning velocity). Varying the velocity may aid the robot in escaping from various situations. The angle that the robot should turn can be random or a function of the degree of escape needed or both. In a preferred embodiment, in low panic situations the robot turns anywhere from 45 to 90 degrees, and in high panic situations the robot turns anywhere from 90 to 270 degrees.

EDGE. The robot follows the edge using its bump sensor until (a) the robot turns 60 degrees without a bump or (b) the robot cumulatively has turned more than 170 degrees since the EDGE behavior initiated. The EDGE behavior may be useful if the average bump distance is low (but not so low as to cause a panic behavior). The EDGE behavior allows the robot to fit through the smallest openings physically possible for the robot and so can allow the robot to escape from confined areas.

WHEEL DROP. The robot back drives wheels briefly, then stops them. The back driving of the wheels helps to minimize false positive wheel drops by giving the wheels a small kick in the opposite direction. If the wheel drop is gone within 2 seconds, the robot continues normal operation.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

SLOW. If a wheel drop or a cliff detector goes off, the robot slows down to speed of 0.235 m/s (or 77% of its normal speed) for a distance of 0.5m and then ramps back up to its normal speed.

- In addition to the coverage behaviors and the escape behaviors, the robot also
- 5 might contain additional behaviors related to safety or usability. For example, if a cliff is detected for more than a predetermined amount of time, the robot may shut off. When a cliff is first detected, a cliff avoidance response behavior takes immediate precedence over all other behaviors, rotating the robot away from the cliff until the robot no longer senses the cliff. In a preferred embodiment, the cliff
  - 10 detection event does not cause a change in operational modes. In other embodiments, the robot could use an algorithm similar to the wall-following behavior to allow for cliff following.

The individual operation of the three operational modes has been described above; we now turn to the preferred mode of switching between the various modes.

- 15 In order to achieve the optimal coverage and cleaning efficiency, a preferred embodiment uses a control program that gives priority to various coverage behaviors. (Escape behaviors, if needed, are always given a higher priority.) For example, the robot 10 may use the wall following mode for a specified or random time period and
- 20 then switch operational modes to the room cleaning. By switching between operational modes, the robotic device of the present invention is able to increase coverage, cleaning efficiency and perceived effectiveness.

- 25 By way of example, FIGS. 13A & 13B show a mobile robot 10 in a "dog bone" shaped environment in which two rooms 115 & 116 of roughly equal dimensions are connected by a narrow passageway 105. (This example illustrates the robot diffusion problem discussed earlier.) This arrangement is a simplified version of typical domestic environments, where the "dog bone" may be generated by the arrangements of obstacles within the room. In FIG. 13A, the path of robot 10 is traced as line 54 as robot 10 operates on in random bounce mode. The robot 10 is
- 30 unable to move from room 116 into 115 during the limited run because the robot's random behavior did not happen to lead the robot through passageway 105. This

WO 02/101477

PCT/US02/18450

method leaves the coverage far less than optimal and the cleaning rate decreased due to the number of times the robot 10 crosses its own path.

FIG. 13B shows the movement of a preferred embodiment of robot 10, whereby the robot cycles between BOUNCE and WALL FOLLOWING behaviors.

- 5 As the robot follows path 99, each time the robot 10 encounters a wall 100, the robot follows the wall for a distance equal to twice the robot's diameter. The portions of the path 99 in which the robot 10 operates in wall following mode are labeled 51. This method provides greatly increased coverage, along with attendant increases in cleaning rate and perceived effectiveness.

- 10 Finally, a preferred embodiment of the present invention is detailed in FIG. 14, in which all three operational modes are used. In a preferred embodiment, the device 10 begins in spiral mode (movement line 45). If a reflective spiral pattern is used, the device continues in spiral mode until a predetermined or random number of reflective events has occurred. If a standard spiral is used (as shown in FIG. 14), the  
15 device should continue until any bump sensor event. In a preferred embodiment, the device immediately enters wall following mode after the triggering event.

- In a preferred embodiment, the device then switches between wall following mode (movement lines 51) and random bounce modes (movement lines 48) based on bump sensor events or the completion of the wall following algorithm. In one  
20 embodiment, the device does not return to spiral mode; in other embodiments, however, the device can enter spiral mode based on a predetermined or random event.

- In a preferred embodiment, the robot keeps a record of the average distance traveled between bumps. The robot then calculates an average bump distance (ABD)  
25 using the following formula:  $(3/4 \times ABD) + (1/4 \times \text{most recent distance between bumps})$ . If the ABD is above a predetermined threshold, the robot will again give priority to the SPIRAL behavior. In still other embodiments, the robot may have a minimum number of bump events before the SPIRAL behavior will again be given priority. In other embodiments, the robot may enter SPIRAL behavior if it travels a  
30 maximum distance, for example 20 feet, without a bump event.

In addition, the robot can also have conditions upon which to stop all operations. For example, for a given room size, which can be manually selected, a

WO 02/101477

PCT/US02/18450

minimum and maximum run time are set and a minimum total distance is selected. When the minimum time and the minimum distance have been reached the robot shuts off. Likewise, if the maximum time has been reached, the robot shuts off.

- Of course, a manual control for selecting between operational modes can also
- 5 be used. For example, a remote control could be used to change or influence operational modes or behaviors. Likewise, a switch mounted on the shell itself could be used to set the operation mode or the switching between modes. For instance, a switch could be used to set the level of clutter in a room to allow the robot a more appropriate coverage algorithm with limited sensing ability.
- 10 One of skill in the art will recognize that portions of the instant invention can be used in autonomous vehicles for a variety of purposes besides cleaning. The scope of the invention should be determined by the appended claims and their legal equivalents, rather than by the examples given.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

We claim:

1. A mobile robot comprising:
  - (a) means for moving the robot over a surface;
  - (b) an obstacle detection sensor;
  - (c) and a control system operatively connected to said obstacle detection sensor and said means for moving;
  - (d) said control system configured to operate the robot in a plurality of modes, said plurality of modes comprising: a spot-coverage mode, an obstacle following mode whereby said robot travels adjacent to an obstacle, and a bounce mode whereby the robot travels substantially in a direction away from an obstacle after encountering an obstacle.
2. A mobile robot according to claim 1 in which said control system is configured to operate first in said spot-coverage mode, then alternate operation between said obstacle following mode and said bounce mode.
3. A mobile robot according to claim 2 in which said spot-coverage mode comprises substantially spiral movement.
4. A mobile robot according to claim 2 in which the control system is configured to return to spot-coverage mode after a predetermined traveling distance.
5. A mobile robot according to claim 2 in which the control system is configured to return to spot-coverage mode after a predetermined elapsed time.
6. A mobile robot according to claim 2 in which the control system is configured to return to spot-coverage mode if the average distance between obstacle interactions is above a predetermined threshold.
7. A mobile robot according to claim 1, whereby said obstacle detection sensor comprises a tactile sensor.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

8. A mobile robot according to claim 7, whereby said obstacle detection sensor further comprises an IR sensor.

5 9. The mobile robot according to claim 1, whereby said obstacle following mode comprises alternating between decreasing the turning radius of the robot as a function of distance traveled such that the robot turns toward said obstacle until the obstacle detection sensor detects an obstacle, and decreasing the turning radius of the robot as a function of distance traveled such that the robot turns away from said  
10 obstacle until the obstacle detection system no longer detects an obstacle.

10. The mobile robot according to claim 1, whereby the robot operates in obstacle following mode for a distance greater than twice the work width of the robot and less than approximately ten times the work width of the robot.

15 11. The mobile robot according to claim 10, whereby the robot operates in obstacle following mode for a distance greater than twice the work width of the robot and less than five times the work width of the robot.

20 12. The mobile robot according to claim 1, further comprising a means for manually selecting an operational mode.

13. A mobile robot comprising:  
25 (a) means for moving the robot over a surface;  
(b) an obstacle detection sensor;  
(c) and a control system operatively connected to said obstacle detection sensor and said means for moving;  
(d) said control system configured to operate the robot in a plurality of modes, said plurality of modes comprising: an obstacle following mode whereby said  
30 robot travels adjacent to an obstacle, and a bounce mode whereby the robot travels substantially in a direction away from an obstacle after encountering an obstacle;

WO 02/101477

PCT/US02/18450

(e) whereby said control system is configured to alternate into said obstacle following mode after a predetermined number of sensor interactions.

14. A mobile robot according to claim 13, wherein said predetermined number of  
5 sensor interactions is randomly determined.

15. A mobile robot according to claim 13, wherein said predetermined number of  
sensor interactions is between approximately 5 and approximately 15.

10 16. A mobile robot according to claim 13, wherein said control system is  
configured to alternate into said bounce mode after the robot travels a predetermined  
distance in said obstacle following mode.

15 17. A mobile robot according to claim 13, wherein said control system is  
configured to alternate into said bounce mode upon either the robot has traveled a  
maximum distance or the robot has traveled a minimum distance and an obstacle has  
been encountered.

18. A mobile robot according to claim 17, wherein said minimum distance is at  
20 least 115 cm.

19. A mobile robot according to claim 18, wherein said maximum distance is less  
than 520 cm.

25 20. A mobile robot according to claim 13, wherein the control system alternates  
operational modes based on the distance traveled by said robot.

21. A mobile robot according to claim 13, further comprising a means for  
determining the level of clutter.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

22. A mobile robot according to claim 21, wherein said means for determining the level of clutter comprises tracking the number of interactions with obstacles over time.
- 5 23. A mobile robot according to claim 22, further comprising a means for inputting the approximate area of the surface, wherein said means for determining the level of clutter further relates to the approximate area of the surface.
- 10 24. A mobile robot according to claim 22, wherein the level of clutter is correlated to the frequency at which the controller alternates operational modes.
25. A mobile robot according to claim 21, wherein the level of clutter is positively correlated to the minimum obstacle following distance.
- 15 26. A mobile robot according to claim 13, wherein the control system alternates between operational modes based upon a lack of sensor input.
27. A mobile robot according to claim 1, wherein said control system further comprises memory wherein an operational system program is stored, said operational system program comprising a plurality of behaviors and an arbiter to select which behavior is given control over the means for moving.
- 20 28. A mobile robot according to claim 27, further comprising an escape behavior.
- 25 29. A mobile robot according to claim 28, wherein said obstacle detection sensor comprises a tactile sensor, and wherein said escape behavior comprises operating in said obstacle following mode.
30. A mobile robot according to claim 28, wherein said escape behavior is triggered by the rate of a motor stall event.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

31. A mobile robot according to claim 30, wherein said escape behavior is triggered by an increase in said rate of a motor stall event.
32. A mobile robot according to claim 28, wherein said escape behavior is triggered by the duration of sensor input.  
5
33. A mobile robot according to claim 28, wherein said escape behavior comprises shutting off the robot.
- 10 34. A mobile robot according to claim 28, wherein said escape behavior is triggered by a lack of sensor input.
35. A mobile robot according to claim 13, further comprising a cliff detector, whereby said control system is configured to reduce the robot's velocity upon  
15 detection of a cliff.
36. A mobile robot according to claim 13, further comprising a wheel drop sensor, whereby said robot utilizes the rate of wheel drop sensor events as input to said control system.  
20
37. A method of controlling a mobile-robot equipped with a sensor for detecting an obstacle, said method comprising the steps of:
  - a. moving in a spiral running motion;
  - b. discontinuing said spiral running motion after the earlier of sensing and obstacle or traveling a predetermined distance;
  - c. running in a substantially forward direction until an obstacle is detected;
  - d. turning and running along said detected obstacle;
  - e. turning away from said obstacle and running in a substantially forward direction; and  
30

WO 02/101477

PCT/US02/18450

- f. thereafter repeating said step of running along said obstacle and said step of turning away from said obstacle.
38. The mobile-robot steering method according to claim 37, further  
5 comprising the step of repeating the spiral running motion after a predetermined number of sensor events.
39. The mobile-robot steering method according to claim 37, whereby the robot runs along said obstacle for at least a minimum distance but less than a maximum  
10 distance.
40. The mobile-robot steering method according to claim 39, whereby said obstacle sensor comprises an IR sensor able to detect said boundary.
- 15 41. The mobile-robot steering method according to claim 40, whereby said obstacle sensor further comprises a tactile sensor.

WO 02/101477

PCT/US02/18450

1 / 16

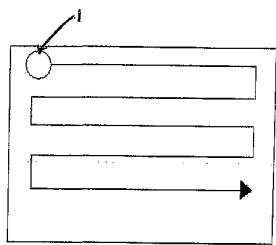


FIG. 1A

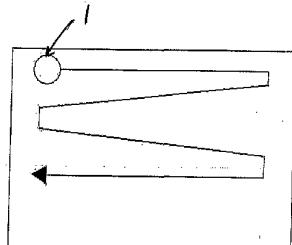


FIG. 1B

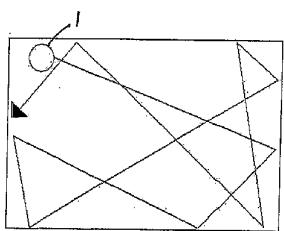


FIG. 1C

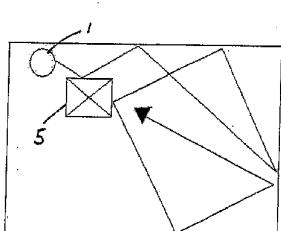


FIG. 1D

WO 02/101477

PCT/US02/18450

2 / 16

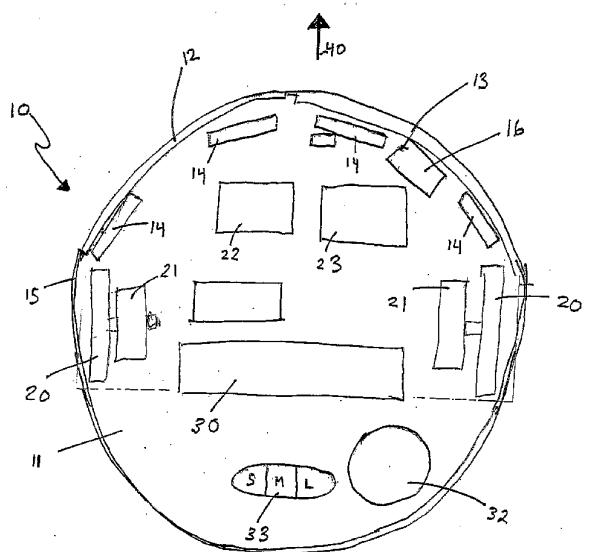


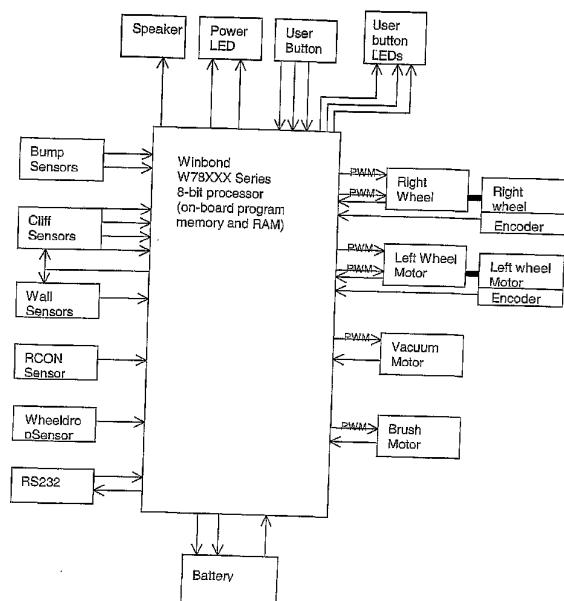
FIG. 2

WO 02/101477

PCT/US02/18450

3 / 16

FIG. 3



WO 02/101477

PCT/US02/18450

4/16

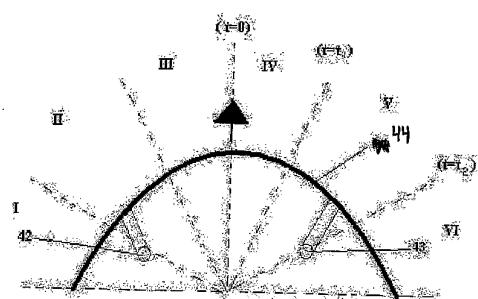


FIG. 4A

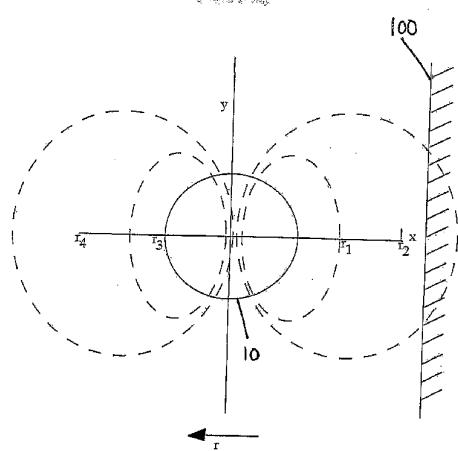


FIG. 4B

WO 02/101477

PCT/US02/18450

5 / 16

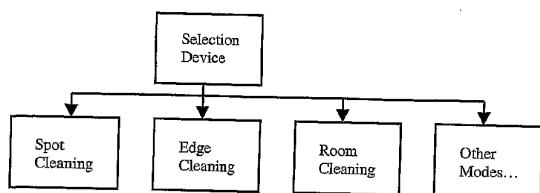


FIG. 5

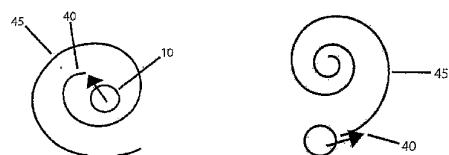


FIG. 6A

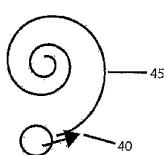


FIG. 6B

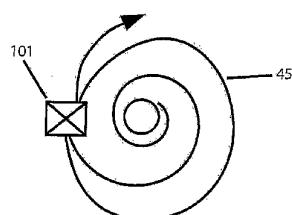


FIG. 6C

WO 02/101477

PCT/US02/18450

6 / 16

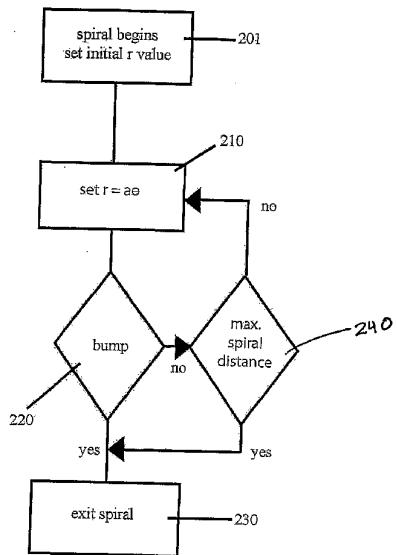


FIG. 7

WO 02/101477

PCT/US02/18450

7 / 16

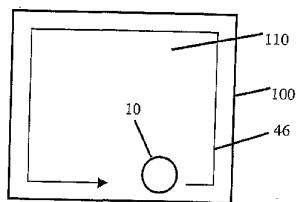


FIG. 8A

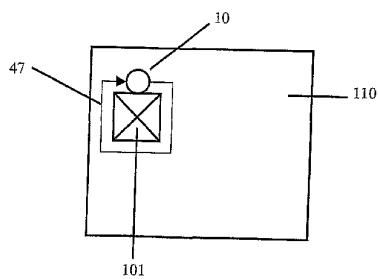
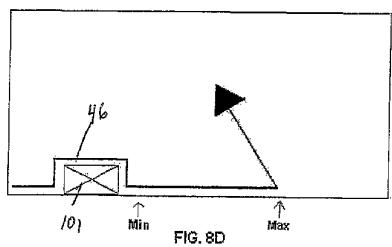
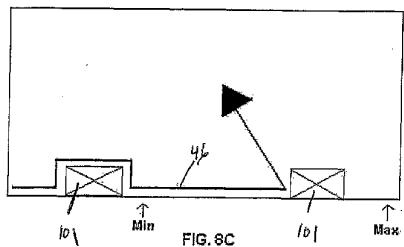


FIG. 8B

WO 02/101477

PCT/US02/18450

8 / 16



WO 02/101477

PCT/US02/18450

9 / 16

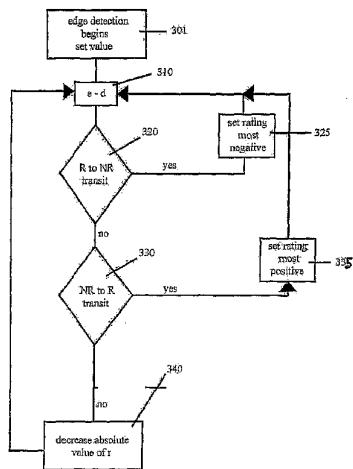


FIG. 9A

WO 02/101477

PCT/US02/18450

10 / 16

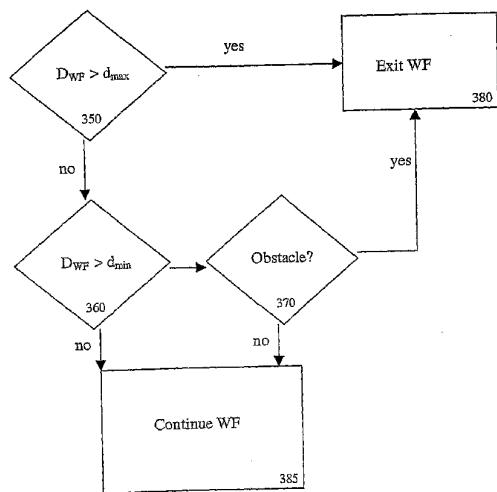


FIG. 9B

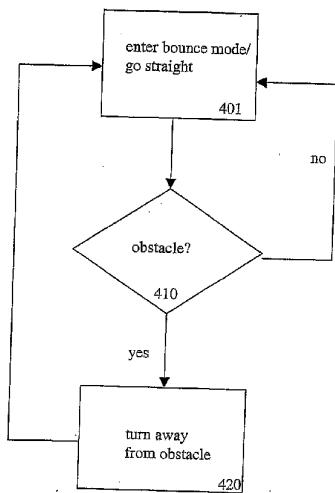


FIG. 10

WO 02/101477

PCT/US02/18450

12 / 16

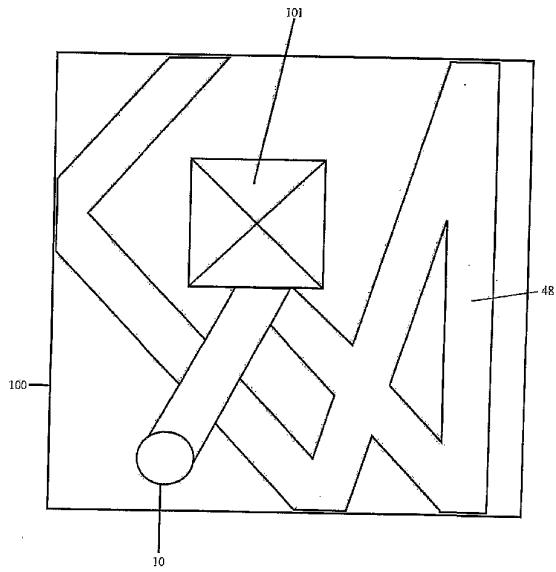


FIG. 11

WO 02/101477

PCT/US02/18450

13 / 16

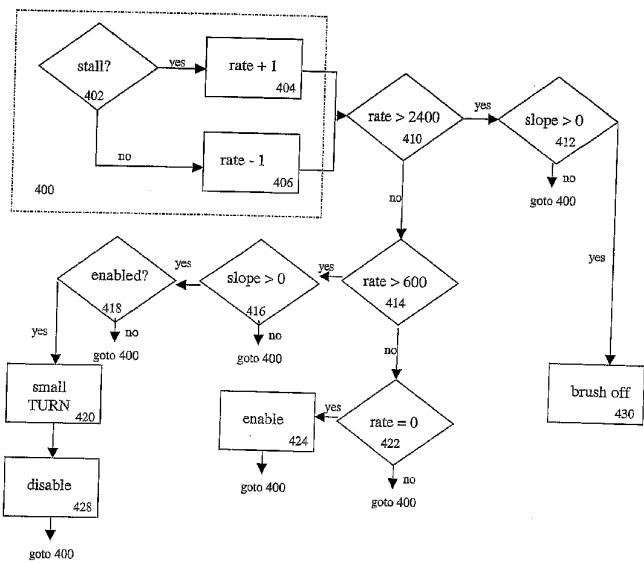


FIG. 12A

WO 02/101477

PCT/US02/18450

14 / 16

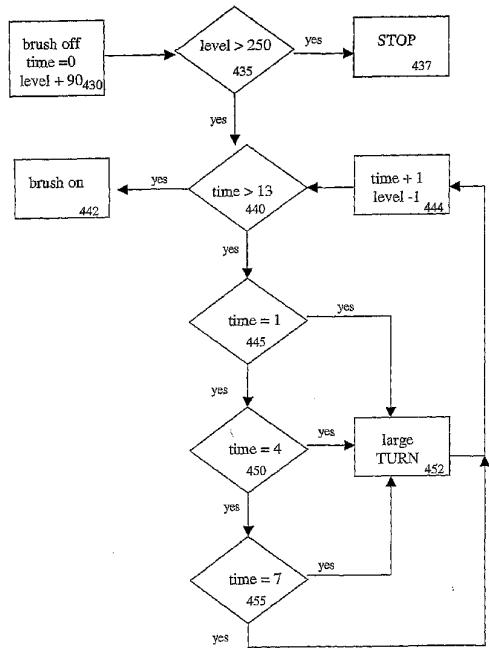


FIG. 12B

WO 02/101477

PCT/US02/18450

15 / 16

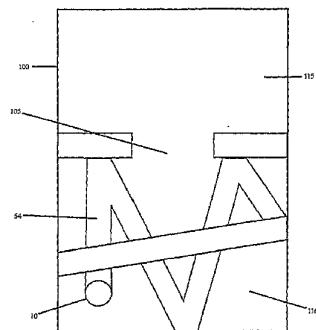
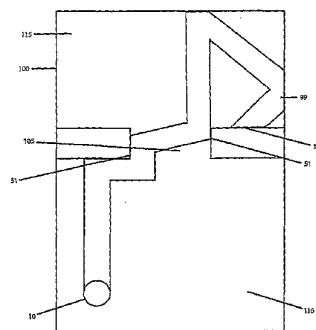


FIG. 13A



WO 02/101477

PCT/US02/18450

16 / 16

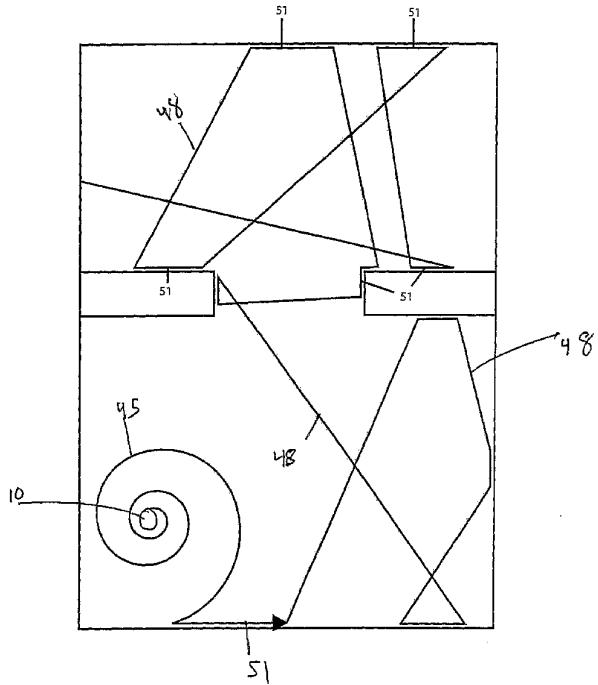


FIG. 14

## 【国際公開パンフレット（コレクトバージョン）】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
19 December 2002 (19.12.2002)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/101477 A3

(51) International Patent Classification\*: G05D 1/02

[US/US]; 9 Redwood Road, Acton, MA 01720 (US),  
MASS, Philip, R., [US/US]; 28 Fleet Street, #12, Boston,  
MA 02113 (US).

(21) International Application Number: PCT/US02/18450

(22) International Filing Date: 12 June 2002 (12.06.2002)

(74) Agent: WEINSTEIN, Glein, D.; iRobot Corporation,  
Twin City Office Center, Suite 6, 22 McGrath Highway,  
Somerville, MA 02143 (US).

(25) Filing Language: English

(81) Designated States (national): AT, AG, AL, AM, AT, AU,  
AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CL, CN, CO, CR, CU,  
CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GI,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG,  
SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(26) Publication Language: English

(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM,  
KI, LS, MW, MZ, SD, SI, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),  
Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM),  
European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR,

(30) Priority Data: 60/297,718 12 June 2001 (12.06.2001) US

[Continued on next page]

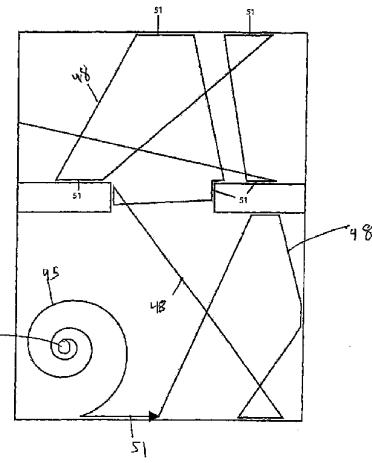
(71) Applicant (for all designated States except US): iROBOT

CORPORATION [US/US]; Twin City Office Center,  
Suite 6, 22 McGrath Highway, Somerville, MA 02143  
(US).

(72) Inventors; and

(75) Inventors/Applicants (for US only): JONES, Joseph

WO 02/101477 A3



**(57) Abstract:** A control system for a mobile robot (10) is provided to effectively cover a given area by operating in a plurality of modes, including an obstacle following mode (51) and a random bounce mode (48). In other embodiments, spot coverage, such as spiraling (45), or other modes are also used to increase effectiveness. In addition, a behavior based architecture is used to implement the control system, and various escape behaviors are used to ensure full coverage.



---

**WO 02/101477 A3**

GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent  
(BH, BJ, CI, CG, CL, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR,  
NI, SN, TD, TG).

(88) Date of publication of the international search report:  
9 October 2003

**Published:**  
— with international search report

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

## 【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		I nternational Application No PCT/US 02/18450
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 G05D1/02		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G05D		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, PAJ		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 204 814 A (NOONAN THOMAS H ET AL) 20 April 1993 (1993-04-20) the whole document	1-41
A	WO 99 59042 A (FRIENDLY MACHINES LTD ;ABRAMSON SHAI (IL); PELESS EHUD (IL); FRIED) 18 November 1999 (1999-11-18) the whole document	1-41
A	US 6 240 342 B1 (HELBACH JOERG ET AL) 29 May 2001 (2001-05-29) the whole document	1-41
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C.		<input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.
* Special categories of cited documents :		
'A' document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance		
'E' earlier document but published on or after the international filing date		
'L' document which may throw doubts on priority (claim(s)) or which is cited to establish the publication date of another document for special reason (as specified)		
'O' document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means		
'P' document published prior to the International filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the International search  4 March 2003		Date of mailing of the International search report  11/03/2003
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5619 Patenttaan 2 NL - 2280 RIV Hoofddorp Tel. (+31-70) 340-3040, Tx. 31 051 epo nl, Fax. (+31-70) 340-3016		Authorized officer  Philippot, B

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

National Application No  
PCT/US 02/18450

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 5204814	A 20-04-1993	NONE		
WO 9959042	A 18-11-1999	IL 124413 A	20-05-2001	
		AU 3844999 A	29-11-1999	
		EP 1078307 A1	28-02-2001	
		WO 9959042 A1	18-11-1999	
US 6240342	B1 29-05-2001	DE 19804195 A1	05-08-1999	
		WO 9940496 A1	12-08-1999	
		DE 59900221 D1	04-10-2001	
		EP 1053516 A1	22-11-2000	
		JP 2002502997 T	29-01-2002	

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 1992)

---

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN, TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE, GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,OM,PH,P L,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 ジョーンズ , ジョセフ

アメリカ合衆国 , マサチューセッツ 01720 , アクトン , レッドウッド ロード 9

(72)発明者 マス , フィリップ アール .

アメリカ合衆国 , マサチューセッツ 02113 , ボストン , #12 , フリート ストリート 2  
8

F ターム(参考) 3B116 AA31 AB51 BA01 BA02 BA35 BB72 CD41  
3C007 AS15 CS08 KS12 KS18 KS31 KS36 KV09 KV11 KV18 KX02  
LS15 LT06 LV14 WA16 WA28 WB21  
5H301 AA02 AA03 BB11 BB12 CC03 CC06 GG06 GG08 GG10 LL01  
LL06 LL11