お掃除ロボットはなぜ部屋を走り回れるのか？
～２輪駆動による移動ロボットの走行原理入門～

東北学院大学工学部　機械知能工学科　熊谷正朗

１　はじめに

1.1　目　的

このテーマでは、ロボットの１ジャンルである「車輪移動ロボット」の走行の原理を理解することを目的とします。また、実験を通して、その原理が実際に成り立つことと、設定の仕方によって様々な動きができることを確かめます。

図１　本田技研 ASIMO
(同社サイトより引用)

1.2　ロボットとは

ロボットは年々身近な存在になりつつあります。以前はロボットというと、工場で自動車を組み立てる風景(産業用ロボット)や、アニメの世界の中のものでしたが、２１世紀に入ってから、ホンダのASIMO(図１)をはじめとするヒューマノイド(人型)ロボットの実演を目にする機会が増え、ペット的な４本脚などのロボットが発売されたり、ルンバ(図２)に代表される掃除ロボットが普及し始めたりしています。また、自動運転自動車の研究が進展したり、東日本大震災・原発事故の現場で人の行けない場所の調査・作業にロボットが投入されてもいます。２０世紀には自動車と飛行機の発展が目立ちましたが、２１世紀は間違いなくロボットの発展が進むといえるでしょう。

図２　iRobot社 ルンバ
(同社サイトより引用)

ロボットは、コンピュータ制御で動く機械(技術的にはメカトロニクスと呼びます)の一種で、自身による判断能力を備え、自動的に動くものです。ただし、どこまでがロボットか、という境界は曖昧で、一般的には「ロボットと自称・他称したもの」がロボットになっています。たとえば、安い掃除ロボットよりは全自動洗濯機のほうが遙かに高度ですが、洗濯ロボットとは呼ばれませんし、エアコンのフィルタ掃除ロボットは、ロボットというよりはただのメカです。

このようなロボットは世界中で様々に研究開発が進められていますが、大きく分けると、マニピュレータと呼ばれる腕型のロボットの研究と、移動するロボットの研究があります。歩くロボットは移動ロボットの一種の脚移動ロボット、掃除ロボットや自動運転自動車は車輪移動ロボットと分類されます。そのほか、クローラ(キャタピラ)で移動するもの、飛び跳ねる物など、いろいろあります。これから身の回りに移

動型のロボットは続々増えていくといえるでしょう。

1.3　車輪移動ロボット

前述の移動ロボットの中で最も多い物が車輪移動ロボットです。車輪移動ロボットは、コンピュータ制御で車輪を回すことで走りますが、機械としては歩行ロボット等に比べて非常に単純で、思った通りに動かしやすい特徴を持ちます。ただし、平坦地に動作が限られます。旧来の日本家屋は敷居などの段差が多く、車輪移動ロボットにとってはつらい環境でしたが、いまではバリアフリー化が進み、ロボットにもよい環境になりました。

車輪移動ロボットには、進行方向を変える方式で大きく二つのグループがあります。一つは三輪車や自動車のような形で、ステアリング操作(自動車の場合は、ハンドルを回すことで前輪の方向を変えて、その方向に曲がります)で、直進したりカーブを曲がったりします。

図３　セグウェイジャパン社 Segway
(同社サイトより引用)

もう一つは方向の変える車輪を持ちません。モータの付いた駆動用の車輪が二つあり、その車輪の回転の調整で、直進・カーブ、さらにはその場での旋回もできます。車輪ではありませんが、建設機械や戦車のキャタピラがこれに似た動きです。このグループのロボットには、掃除ロボットがあります。また、セグウェイ(図３)は２個の車輪だけでバランスを取って走行することに目がいきますが、その２個の車輪の回転で方向転換を行います。

この二輪で動かすタイプは構造も簡単で、コンピュータの計算も楽なため、移動ロボットの主流です。日常生活の車両は前者のステアリング型が主流ですが、この違いは主に動力源にあると考えられます。二輪型は２個の車輪に同じ出力の動力を用意する必要があり、後に説明するように前向き、後ろ向きに細かく回転を調整できる必要があります。それに対して、現在の車両の動力源はエンジン(や人力)であり、速度調整はできるものの１個を一方に回すのみです(バックするときはメカ的に歯車を切り替えている)。この先、自動車の電気化が進むと、あるいは、２輪型の自動車も増えてくるかもしれません(後２輪が独立駆動で、前輪が付属の３輪車など。実は人が乗る大型の乗用芝刈り機などでこのタイプがあります)。

1.4 本講座の目的

上で述べた形式のロボットを「対向２輪駆動ロボット」(単に対向２輪)と呼びます。ほかにも、独立２輪駆動型などの呼び方もあります。この技術は現在は主に研究で使われていますが、これから日常の移動するロボットでどんどん使われるようになると考えられます。現に市販されている掃除ロボット等がこの形式です。そこで、本講座では、この対向２輪型ロボットの基本原理を理解し、実際に車輪の速度を調整することで走り方が変わることを確認することを目的とします。

2　対向２輪駆動型ロボットの原理

2.1 対向２輪ロボットのメカニズム

対向２輪型は、すくなくとも、駆動する車輪が２個あります。あとで述べるように左右の車輪の速度によって走り方が変わるため、それぞれ回転方向と速度を自由に調整できる必要があります。一般的な自動車も２輪駆動ですが、これは両輪合わせての駆動なので片方ずつ調整することはできません。

セグウェイのように２輪でバランスを取る場合は希で、一般には駆動輪に加えて、傾かないようにするために支える車輪、たとえばキャスタのようなものが用いられます。駆動輪やロボットの重心の位置関係によって、三輪車の前輪のように三角形をなすように追加される場合もありますし、菱形をなすように、駆動輪の前後に追加される場合もあります。

駆動輪を自由に動かすためには、モータと減速装置(ギアボックス)を用います。モータの回転とある比率で車輪が回るようになっており、本格的に制御する場合には、モータの回転速度や回転角度を正確に調整します。

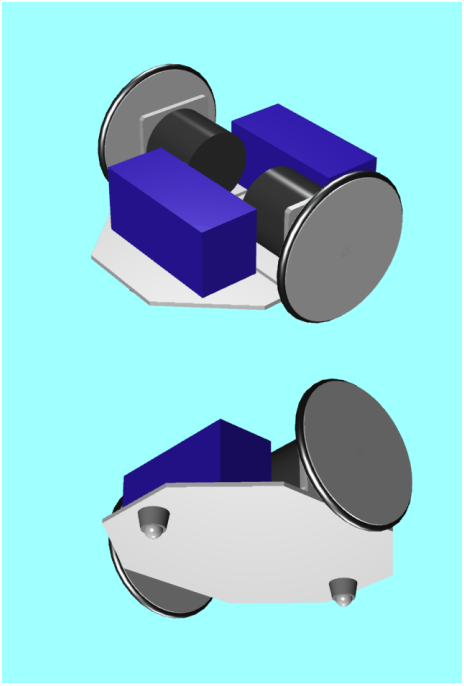

図４　対向２輪型ロボットの基本構造。独立して回転制御できる車輪を左右に備え、裏には補助的にキャスタを取り付けることが多い。

2.2 対向２輪ロボットの「算数」的解釈

本来、このようなロボットは高校以降で習う数学に基づいて制御されますが、その根本的な原理は小学校の算数の範囲でも説明ができます。

・[*速度*]＝[*道のり*]／[*時間*]
・[*円周*]＝[*直径*]×[*円周率*]
　　＝[*半径*]×２×[*円周率*]
・[*扇形の円弧(周)の長さ*]
　　＝[*円周*]×[*全周に対する割合*]

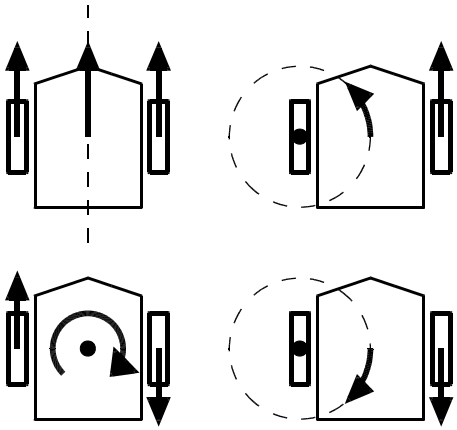

図５　対向２輪型ロボットの車輪回転と走行の方向

まず、基本的な原理は、工事現場の建設機械や戦車などのキャタピラと似ています。つまり、図５に示すように、

・左右の車輪をともに同じ速さで前進方向に回す→まっすぐ前進

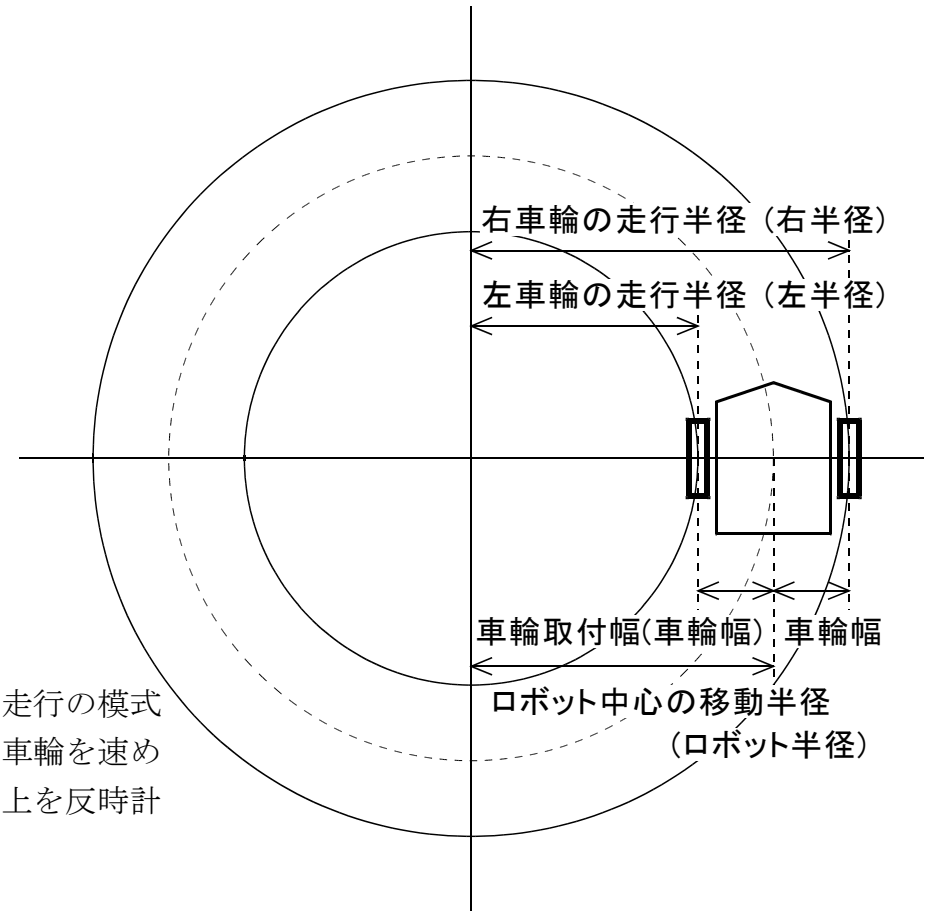

図６　ロボットの走行の模式図。左車輪より右車輪を速めにした場合は、円上を反時計回りに走行する。

・左の車輪を止め、右の車輪のみを前に回す→左の車輪を中心として左前方向に回る
・左の車輪を止め、右の車輪のみを後に回す→左の車輪を中心として左後方向に回る
・左の車輪を前に、右の車輪を後に回す→上から見て時計回りにその場で回転

などの移動になります。

次に、車輪を単に回すのではなく、速度を調整して回す場合を考えます。たとえば、どちらも前進方向に、右の車輪を左の車輪より速く回します。直感的には左の方にカーブを描いて走りそうですが、どのようなカーブになるでしょうか。

図６を書いて計算してみます。左右の車輪とも一定の速度で移動する場合は、円を描いて進みます(同速度の場合は直線)。図６では、左右の車輪が移動する経路(実線)と、ロボットの中心が移動する経路(破線)の円があります。ある時間をかけて、一周したとして以下の関係が成立します。

※[()]内は短縮した表記

・[*右車輪の走行距離(右走行距離)*]＝[*右車輪の走行半径(右半径)*]×２×円周率
＝[*右車輪の走行速度(右走行速度)*]×[*一周時間*]
・[*右半径*]＝[*ロボット中心の移動半径(ロボット半径)*]＋[*車輪取付幅(車輪幅)*]
・[*左車輪の走行距離(左走行距離)*]＝[*左車輪の走行半径(左半径)*]×２×円周率
＝[*左車輪の走行速度(左走行速度)*]×[*一周時間*]
・[*左半径*]＝[*ロボット半径*]－[*車輪幅*]

ここで、次の計算をしてみます。

・$\dfrac{[右走行距離]+[左走行距離]}{[右走行距離]-[左走行距離]}\times[車輪幅]$

→代入(置き換え)

$=\dfrac{[右半径]\times2\times円周率\ +\ [左半径]\times2\times円周率}{[右半径]\times2\times円周率\ -\ [左半径]\times2\times円周率}\times[車輪幅]$

→分子分母を「２×円周率」で約分

$=\dfrac{[右半径]\ +\ [左半径]}{[右半径]\ -\ [左半径]}\times[車輪幅]$

→分子は代入、分母は代入もしくは図からも確認できる

$=\dfrac{([ロボット半径]+[車輪幅])\ +\ ([ロボット半径]-[車輪幅])}{[車輪幅]\times2}\times[車輪幅]$

$=\dfrac{[ロボット半径]\times2}{[車輪幅]\times2}\times[車輪幅]$

→分子分母を「２」で約分

$=[ロボット半径]\div[車輪幅]\times[車輪幅]\ \ =\ \ [ロボット半径]$

このように、この左右の走行距離から計算した結果、ロボットの走る円の半径がわかります。この半径は、速度でも計算することができます。

・$\dfrac{[右走行距離]+[左走行距離]}{[右走行距離]-[左走行距離]}\times[車輪幅]$　　※先ほどの計算の冒頭

→速度式を代入

$=\dfrac{[右走行速度]\times[一周時間]+[左走行速度]\times[一周時間]}{[右走行速度]\times[一周時間]-[左走行速度]\times[一周時間]}\times[車輪幅]$

→「[一周時間]」で約分

$=\dfrac{[右走行速度]+[左走行速度]}{[右走行速度]-[左走行速度]}\times[車輪幅]\ =\ [ロボット半径]$

※先ほどの結末

つまり、車輪の速度でロボットの走行の半径が決まります。さらに、簡単な計算で、

・$([右走行速度]+[左走行速度])\div2\ \ =\ \ [ロボットの線に沿った移動速度]$

であることが示せます。よって、逆に、ロボットをある速度で走らせる場合、

・[*左右の速度差*]　＝　[*右走行速度*]－[*左走行速度*]

$$= \frac{[\text{ロボット移動速度}] \times 2}{[\text{ロボットの半径}]} \times [\text{車輪幅}]$$

で、左右の速度差が求められるので、

・[*右車輪速度*]＝[*ロボット移動速度*]＋[*左右の速度差*]÷２

・[*左車輪速度*]＝[*ロボット移動速度*]－[*左右の速度差*]÷２

として、両輪の速度を決めることができます。

以上のように、このタイプの車輪移動ロボットは、[左車輪の移動速度][右車輪の移動速度]を適切に選ぶことで、ロボットの移動速度や、どのくらいの半径でカーブを描いて曲がるかを決めることができます。

この式は車輪の前進を正、後退を負として扱うことで前進側だけではなく後退側にも使えます。また、図６のような反時計回りでは[*ロボット半径*]が正となり、負となった場合は時計回りの円になります。先ほどの説明の、「左車輪を前に、右車輪を後に回すとその場で回転する」は、これらの式では「左右の速度差はあるが、和はゼロ」という結果になります。

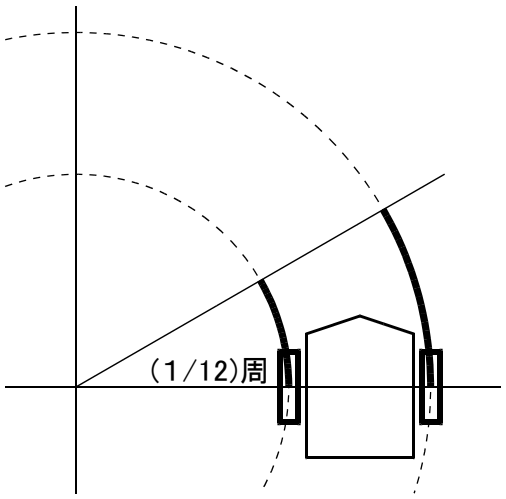

図７　ロボットの移動が一周分の時間に満たなかった場合は扇形の円弧のみとなる。

ここまでは、一周する円を走行することを考えましたが、もちろん、図７に示すように、一周に満たない時間で走った場合、たとえば、走行時間が、本来一周に必要な時間の1/12だった場合には、中心の角度が360度の1/12、つまり30度分の扇形の弧の上を走るのみとなります。また、図８に示すように、この扇形の走行や直線を組み合わせることで、様々な経路を通って移動させることができます。実際には、急に車輪を回したり止めたり速度を変えることはできないため、このように断続的な組み合わせはできずになめらかに運動をつなぎます(半径が徐々に変化する)。掃除ロボットの渦巻き状の走行もなめらかに半径を大きくしていく運動の一つです。

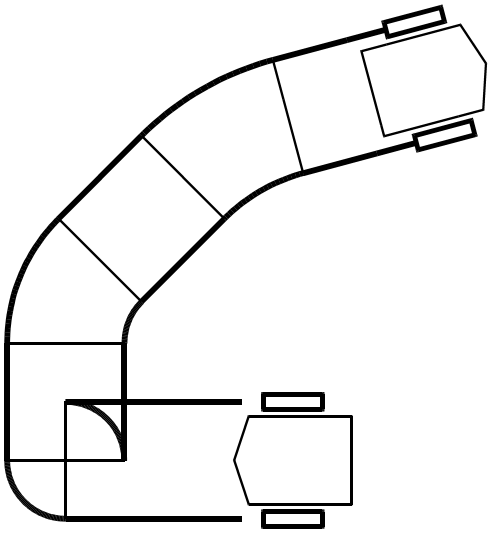

図８　区分的な直線や円弧の走行の積み重ねによって、ロボットは自由な経路を組み立てて走行できる。

ロボットの走行では、この上にさらに、「どのように走らせるか」「車輪が滑ったらどうするか」「電池が減ったときどうするか」などの様々な工夫が入っていますが、「走る」というところだけでならば、以上で原理は説明できます。

2.3 対向２輪ロボットの「数学」的解釈と自己位置推定

数学を導入することで、上述の式はよりシンプルに書き表せます。詳細は
http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/contents/course/robotics/wheelrobot.html
に説明していますが、上述の式が導かれる過程も、それほど難しいわけではありません。

角度の単位をラジアン(0～360度＝0～2π，2×円周率)とすると、扇形の中心角は

・中心角＝([*右走行距離*]－[*左走行距離*])÷(*車輪幅*×２)

で計算できます。また、幾何学的に、現在の位置とロボットの進行方向から、ある時間の扇形の運動の後での位置と方向を求めることができます。これを順次繰り返すと、ロボットの走り始めから、現在までの経路を順に計算し、ロボットの位置と姿勢を把握することができます。

綺麗に円弧上を走るためには、左右の速度比が一定であり続けなければならないため、現実的ではありません。そこで、ごく短い時間(たとえば1/100秒)の左右の走行距離を車輪の回転センサなどで測定し「その短い時間なら速度はほとんど変わらない＝円弧」とみなして、計算をします。

この情報をもとにすると、ロボットがいまどこにいるかを知ることができ、これは「自己位置推定」(デッドレコニング、オドメトリ)と呼ばれる、車輪移動ロボットには重要な技術です。ただし、車輪が滑ってしまうとずれが生じ、また、タイヤの幅などで[*車輪幅*]に誤差があると進行方向に誤差がでます。ロボットの誤差では、位置の10cmのずれよりも、角度1度のずれのほうが後々の影響が大きいために問題になります。そこで、現実的にはロボットにその他のセンサ、たとえば、屋外ではGPS、屋内ではレーザを使って周囲の壁などを測定するセンサをつかって、位置の補正をすることが必要になります。

３　掃除ロボットとして必要なこと

掃除ロボットとして「ゴミを吸うこと」以外に、必要な機能をみてみましょう。

3.1 床面を面として走行する

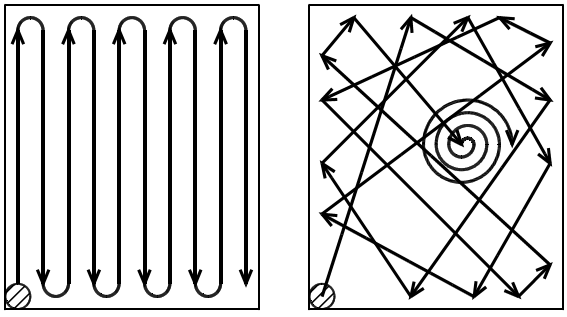

図９　平行に往復しながらの走行と、ランダム走行・渦巻き走行

ロボットの走行はあくまで線であるため、掃除ロボットとしてつかうためには、面を埋めていくような走行が必要になります。

本格的には、図９左のように一定の間隔で平行に走行を繰り返すことで全体をカバーします(たとえば、田んぼでの田植機や収穫用コンバインの動き)。ただし、この場合は、ロボットが自分の位置をほぼ正確に分かっている必要があり、どのように走行するか、たとえば、形に凹凸がある外周部分や、部屋の中にある障害物をどうするか

を含めて、経路を決めなければなりません。このタイプの掃除機は、レーザによる広範囲の壁センサや、天井を撮影して地図代わりにするカメラ系センサの方法などを用いて自分の位置を特定します。

もう一つの方法は、図９右のように部屋の中をランダムに走り回る方法です。たとえば、何かに当たるたびに適当に方向を変えて走り始めるようにします。これはロボットを制御するコンピュータやその上のソフトは非常に楽になります。ただし、上の方法が効率よく部屋の床面を埋めていくことに対して、重複があったり(それはそれで綺麗になるのでいいのですが)時間がかかったりするうえに、掃除漏れが発生しやすくなります。これに加えて局所的には渦巻き状に走るなどが加えられているようです。

どちらが良いかと言えば、前者のほうが良いのですが、複雑なぶんだけ値段が高くなりやすく、かつ、不具合も起きやすくなります。一説には、現状の掃除ロボットは「ちょっとドジなペット」的な認識をされて可愛がられている場合も多いようで、後者で十分なケースがあるようです。そこまで想定していた設計のバランス・コンセプトかどうかは不明ですが。

3.2 障害物回避

自動的に走り回る上では、障害物の回避は不可欠です。壁のように常にある障害物もあれば、そこら辺にたまたま置かれていたものなどもあります。

掃除ロボットにおける障害物は大きく以下の種類に分けられるようです。

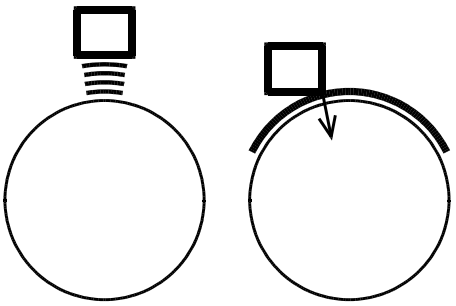

図10　障害物の検出

・床面上にある障害物：　光の反射を利用したセンサで見つける場合もありますが、多くの場合はロボットの側面(大抵は前の側面)のスイッチを使います。側面が動くようになっており、外から押されるとスイッチが入り、衝突を検知します(バンパースイッチと呼ばれる)。本来は移動ロボットの分野では「ぶつかって判断」は許されないのですが、掃除ロボットの場合は速度も遅く、ぶつかっても大きな問題にはならないため、この方法が採用されています。ただし、大きめのクッションは問題なくても、座布団には乗り上げてしまう場合があるようです。

・下に降りる段差：　別の言い方をすれば、そのまま走ると下に落ちてしまう段差や階段です。これはロボットの下面に光の反射を利用したセンサを取り付け、それまであった地面が見つからなくなったことで検知できます。ただ、日本の家屋ではこれが少し問題になるようです。米国で購入した掃除ロボットを使ってみたところ、畳の間から板の間に出るところの数センチの段差は検知できな

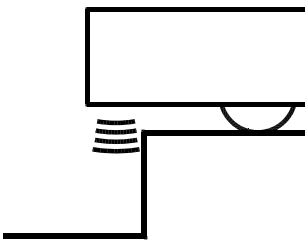

図11　段差の検出

かったらしく、落ちてしまいました。しかも、斜めに引っかかったために車輪が浮いてしまい、そこから走れなくなっていました。欧米の住宅では、このような段差は階段並に大きいことが一般的で、センサの設定が対応できなかったようです。

・「この先にはいかないで」ライン：　掃除ロボットは、上のような障害物に当たらなければどこまでもいってしまいます。そのため、想定外のところに走って行ったり、遠くまで来た結果、完全に迷子になって戻れなくなる場合が多くなります。そのほかにも掃除範囲を限定したいことはあると思います。こういう場合には、ゴム磁石のテープが使われる場合があります。カーペットの下などに、そのゴム磁石のテープをいれておき、ロボットには磁気のセンサをつけておきます。磁気が感じられたら、上の障害物のように扱うことで、そこから先には行かないようにすることができます。

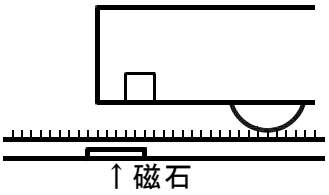

図12　磁石テープによる見えない壁

他にも、床面の凹凸なども障害物になり得ますが、ある程度はむりやり乗り越えるような設計になっています。それゆえ、ロボットが通るところはある程度片付けておかなければなりません。
※一説には、ロボットを動かせるようにすることで、部屋が綺麗になるとか...

3.3 ロボットの充電

ロボットは充電池で動いているため、いずれは充電する必要があります。最も単純な方法は、止まっているロボットを人間が拾ってきて、スマートホンやノートパソコンなどと同様に、充電用のケーブルを差し込んで充電する方法です。一方、すこし高級なロボットの場合は、充電場所を予め部屋の中に設置しておくと、ロボットが自動的にそこにやってきて、充電していきます。これができると、ほぼ自動で動くシステムになります。充電器とは簡単に電極が接していたりするだけで、問題になるのはどうやって戻ってくるか、です。

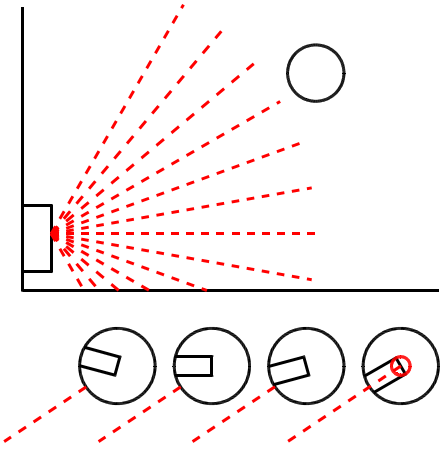
図13　充電ステーションからの誘導光とロボットの旋回による方向探知の例

先に説明したような、自分の居場所を常にセンサなどで確認しているロボットの場合は、充電場所も分かっているため、適切な経路をたどって、すぐに充電場所に戻ってくることができます。では、ランダムに走り回る場合はどうすればいいでしょうか？　このための簡単な方法のひとつは、充電場所を「灯台」にすることです。充電場所から常に赤外線などを発しておき、ロボットが充電したくなったときはその光の方角を探します。たとえば、ロボットに赤外線を感知するセンサをつけておきます。このセンサの視野

を狭くしておき、ロボットにその場で回転させます。そうすると、充電場所のほうを向いたときだけセンサが反応するため、方向が分かります。もし、すぐに見つからなければ、なにかの物陰の可能性があるため、適当に少し走ってみてから同じことを繰り返します。同じ部屋の中であれば、比較的簡単に充電場所を見つけることができるでしょう。ただし、開いていたドアからどこか別の部屋にいってしまったような場合は、この方法では戻ってくることが難しく、どこかで電池切れで力尽きてしまいます。

充電も走行も、本当の実用を目指そうとすると、確実さが求められます。確実さを追求していくと複雑になり、値段が高くなります。そういう意味で、いまの掃除ロボットはほどほどの所を手軽に狙っていると言えます。

4　ロボットによる動作の実験実習

以上のような、ロボットの原理について、簡単なロボットで動作の確認をできる実習を行います。このロボットはプログラムをつくることなく、左右の車輪の速度をツマミで設定できるようになっており、ここまでの説明の原理の確認の他、さまざまな走行の図形を書くことができます。詳細については実習の時、改めて説明します。

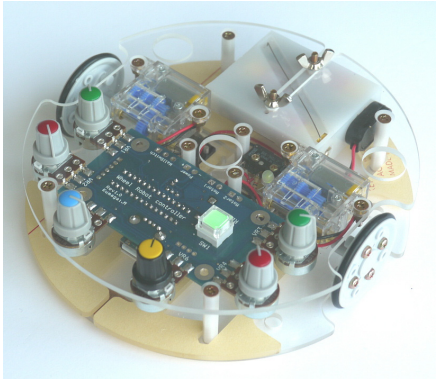

図14　実習用２輪ロボット

5　まとめ

これからの時代、身の回りには「ロボットには見えないけど、ロボット由来の技術」はどんどん増えていきます。それらに加えて、「ものとしてのロボット」も徐々に増えていくでしょう。そのようなロボットが動くときの手段としての車輪移動ロボットは重要な意味を持ちます。今回は、ロボット本来の「コンピュータ制御の機械である」という部分には、敢えてあまり触れませんでした。この部分はどうしても技術的な専門性が高くなるため、関心を持って頂いた場合に、別途お伝えできればと思います。

参考：

ロボット開発工学研究室：

http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/

※当研究室のWEBサイト

講義情報：ロボット基礎工学：

http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/contents/course/robotics/indexframe.html

※大学生向けのロボットの動作に関する理論の科目

「ロボット博士(はかせ)の基礎からのメカトロニクスセミナー」：

http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/contents/sendai/mechatro/indexframe.html

※社会人技術者向けの様々なロボット関連技術の解説(仙台市産業振興事業団)