

自立型車椅子ロボットによる障害物回避および壁沿い行動の実現

宮崎大学工学部教育研究支援技術センター
甲斐 崇浩

はじめに

急速に、そして確実に進展している高齢化社会は、日本にとってこれからますます多くの課題を抱えていくことになると思われる。高齢者人口が増加する中で、日常生活における高齢者の支援は大変重要であると同時に様々な分野の支援が考えられる。さらに、身体に不自由のある方に対する日常生活の支援についても同じく、様々な分野における支援が必要であり重要である。一般に「日常生活における支援」とは、高齢者ならば介護する方、身体に不自由のある方ならば世話をしている方が行うものであるが、ここで取り上げたいのは、高齢者および身体に不自由のある方自身に対する「自立的な日常生活の支援」ということである。この「自立的な日常生活の支援」のための一手段に、電動車椅子というものがあると思われる。電動車椅子は、自分でジョイスティックを操作することで走行方向を決定し、モータ制御により走行するものである。高齢者や身体に不自由のある方が、介護者あるいは世話をしている方なしで行動することが可能になり、さらにその行動範囲を大幅に広げた大変便利なものである。しかし、片方の手でジョイスティックを操作し走行させるということが、高齢者や身体に不自由のある方にとって困難な場合も少なくないと思われる。

そこで、電動車椅子の利用者が容易に運転し走行できることを目的とした、自立型の電動車椅子を開発した。市販されている電動車椅子をコンピュータ制御できるように改造し、電動車椅子の周囲に、障害物を回避することおよび壁沿い走行をするための赤外線センサを搭載する。この赤外線センサから得られる情報をコンピュータに取り込み処理した後、電動車椅子に行動命令を出力することで、自立型の電動車椅子を実現するというものである。電動車椅子ロボットの障害物回避および壁沿い走行を実現するためのプロセスと制御方法について述べることにする。

キーワード: 赤外線センサ 神経回路 電動車椅子

1. 実験ロボットの構成

本研究では以下に示す電動車椅子を改造し、障害物を回避しながら壁沿い走行をする自立型車椅子ロボットのシステムを構築した。システム構成は、以下のとおりである。

- 電動車椅子 MD-100(松永製作所)
- 赤外線センサ GP2D12(SHARP)
- AD/DA 変換ボード PCI-3522A (Interface)
- PC CPU: PentiumIV 2.66GHz,
OS: RedHatLinux7.3

1.1 電動車椅子

今回使用した電動車椅子の概観を Fig.1 に示す。

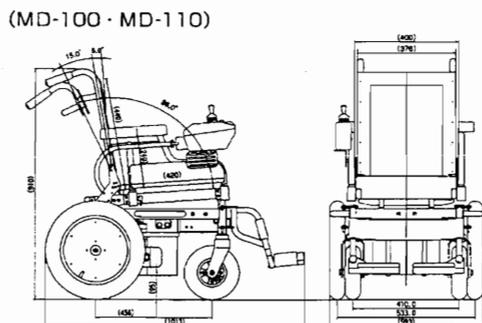


Fig.1 電動車椅子 MD-100 の概観図^[1]

1.2 赤外線センサ

次に、障害物を回避すること及び壁沿いを走行する目的のために用いる赤外線センサについて説明する。本研究では SHARP 社の測距センサユニット GP2D12 を用いた。このセンサは、受光素子である PSD(Position Sensitive Detector)、発光素子の LED 及び信号処理回路が含まれた専用制御用 IC が内蔵されているユニットなので、外部制御回路が不要であり、検出距離に応じた電圧を出力するアナログ出力型のセンサである。赤外線センサ(GP2D12)の仕様と、出力電圧と物体への反射距離の関係を Fig.2 に示す。

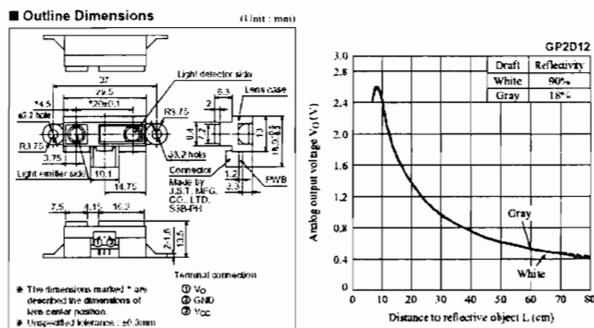


Fig.2 赤外線センサ(GP2D12)の仕様^[4]

1.3 AD/DA 変換ボード

電動車椅子とPCを接続し、AD/DA 変換処理を行うための PCI ボードに、Interface 社の PCI-3522A を使用した。Table.1 にその仕様を示す。

Table.1 PCI-3522A の基本仕様

| | |
|----------|----------------------|
| 項目 | |
| デジタル入出力 | 入力2点, 出力2点(各TTL) |
| 電源仕様 | DC+5V |
| AD仕様 | |
| 入力チャンネル数 | シングルエンド入力8チャンネル |
| 入力形式 | マルチプレクサ方式 |
| 入力レンジ | ユニポーラ:+10V |
| 分解能 | 12bit |
| 変換時間 | 10 μ s(チャンネル固定時) |
| DA仕様 | |
| 出力チャンネル数 | 4チャンネル |
| 出力レンジ | ユニポーラ:+10V |
| 分解能 | 12bit |

2. 自立型電動車椅子ロボットシステム

2.1 システム構築準備

前節までに述べた機器により、自立型電動車椅子ロボットシステムを構築した。まず構築準備として電動車椅子の運転制御部分であるジョイスティックコントローラについての解析を行った。ジョイスティックコントローラに接続されている 5 本の信号線により、運転制御信号がメインコントローラ部へ送られている。5 本の信号線のうち 2 本は電源関係の信号線 (Vcc,GND) であり、残り 3 本の信号線 (ye, bu, gr) により実際の運転制御が行われていると予測されたので、ジョイスティックを前後左右に倒した時に ye, bu, gr に流れる電圧を測定した。ジョイスティックの動作に対する電圧の変化及びジョイスティックの方向定義を、Table.2, Fig.3 に示す。

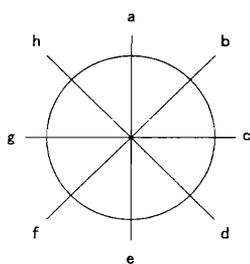


Fig.3 ジョイスティックの方向定義

Table.2 ジョイスティックの電圧値の変化(単位: v)

| | a | b | c | d | e | f | g | h |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ye | 6.9 | 6.9 | 5.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 5.7 | 6.9 |
| bu | 5.7 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 5.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| gr | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 |

Table.2 より、gr はジョイスティックの動作に関係なく一定の電圧値を保ち、ye, bu に関してはジョイスティックの方向により電圧の変化が見られた。この結果により、gr は基準電圧であり、ジョイスティックの運転制御信号は ye と bu であることがわかった。さらに Table.2 の ye, bu の電圧値の変化から、ye が前後動作信号、bu が左右動作信号であることがわかった。

次に赤外線センサの実装について述べる。Fig.2 の特性図より GP2D12 は物体までの距離が約 8cm 以降で、ほぼ反比例の関係にあることがわかる。しかし、物体までの距離が 8cm 以下になると、その関係とは全く異なった特性を示す。つまり、この GP2D12 は 8cm 以下の物体を対象とするには不向きであることがわかった。

今回構築した自立型電動車椅子ロボットに装備する赤外線センサは、ロボットが自立走行する上で障害物回避と壁沿い走行のために用いる。そこで障害物、壁になるとと思われる 8 つの材料を用いてセンサの感度にどのような違いがあるのかを実験した。測定に用いた材料は、アルミニウム、コンクリート、木材、人間、衣服、鉄、プラスチック、段ボール紙の 8 種類である。測定結果を Fig.4 に示す。

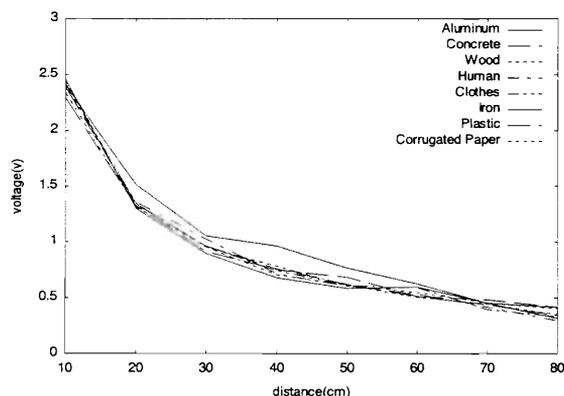


Fig.4 赤外線センサの材料に対する反応距離

測定の結果、若干の差はあるものの全ての材料が同じような結果をとることがわかった。Fig.4 より、材料による補正なしにこの赤外線センサを自立型電動車椅子ロボットに装備することができると考えた。

2.2 システム実装

このロボットの周囲に赤外線センサを7個取り付け、センサから得られる情報だけで運転制御することを考えた。赤外線センサから得られる情報をコンピュータに取り込み処理することにより障害物を回避しながら壁沿いを自立走行するシステムを構築する。システム構成図を Fig.5 に示す。この自立走行する車椅子ロボットの信号処理の流れは、次のとおりである。

赤外線センサから得られる情報は第2節でも述べたとおり、アナログ信号なので AD/DA 変換ボードで AD 変換し、Navigation Algorithm の入力とする。Navigation Algorithm で処理された値(次回動作命令)を DA 変換し、車椅子のコントローラ部へ出力するという一連の流れにより自立走行を実現している。さらに、コンピュータ制御による走行と電動車椅子のみの運転の切り替えをするためのスイッチ回路も作成し、柔軟に実験走行ができるようにした。

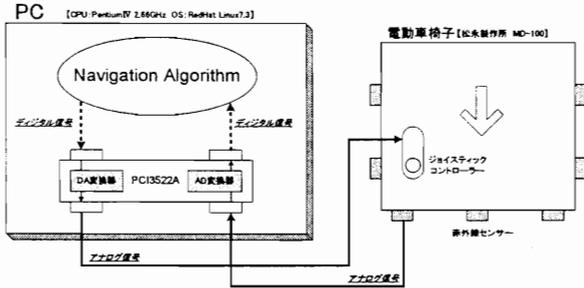


Fig.5 自立型車椅子ロボットシステム構成図

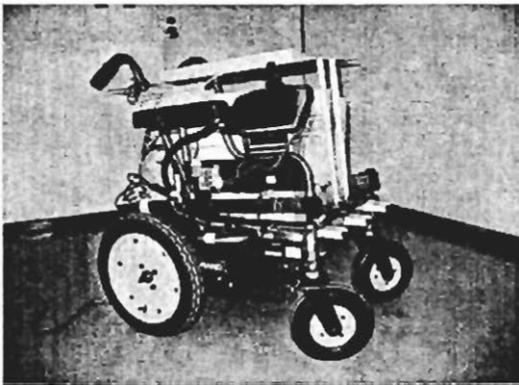


Fig.6 自立型車椅子ロボット概観図

3. 自立型車椅子ロボットの制御方法

3.1 条件式による制御

前節までのとおり、車椅子とコンピュータとのインターフェース部分は完成した。ここでは車椅子の壁沿い走行と障害物回避を実現するための、条件式による制御アルゴリズムについて述べる。まず、赤外線センサの配置については、3.2節でも述べたとおり車椅子の周囲に7個配置し、Fig.7のように定義した。赤外線センサの配置についての理由は以下のとおりである。

- 壁沿い走行をするうえで、車椅子は壁に対して並行しなければならないので、左右それぞれの前後(x_3, x_4, x_5, x_6)に配置した。
- 車椅子に対して前方にある障害物を回避するために x_0, x_1, x_2 を配置した。

なお、前方センサは3つのセンサの平均値とした。

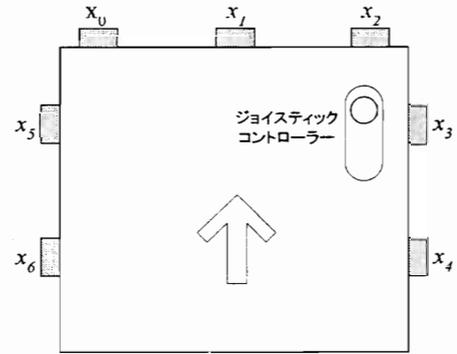


Fig.7 赤外線センサの配置図(上面図)

各センサを便宜上、以下のように定義した。

$$\begin{aligned}
 X_0 &= (x_0 + x_1 + x_2)/3.0 \\
 X_1 &= x_3 & X_2 &= x_4 \\
 X_3 &= x_5 & X_4 &= x_6
 \end{aligned} \tag{1}$$

これらのセンサ入力から、まず右側の壁沿い走行と障害物回避について考える。右側壁沿い走行に注目するので使用するセンサは、 X_0, X_1, X_2 となる。これらのセンサの値とそのときの行動、つまり、車椅子が障害物回避及び右側壁沿いをするための行動パターンを Table.3 にまとめた。センサの値に閾値を決め、それ以上の値を各センサが返してくれば1、閾値以下の値を返せば0とする。

Table.3 センサの値と行動パターン

| X_0 | X_1 | X_2 | 行動パターン |
|-------|-------|-------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 右旋回 |
| 0 | 0 | 1 | 右旋回 |
| 0 | 1 | 0 | 左旋回 |
| 0 | 1 | 1 | 直進 |
| 1 | 0 | 0 | 左旋回(その場回転) |
| 1 | 0 | 1 | 左旋回(その場回転) |
| 1 | 1 | 0 | 左旋回(その場回転) |
| 1 | 1 | 1 | 左旋回(その場回転) |

例えば、 $(X_0, X_1, X_2) = (0, 1, 0)$ の場合、センサは、 x_3 のみ反応する。この場合、車椅子は壁に対して右斜めを向いているものと考えられる。このまま進むと、右側の壁に近づくので左旋回する必要がある。また、 $(X_0, X_1, X_2) = (1, 0, 0)$ の場合、 x_0, x_1, x_2 つまり前方のセンサが反応する。この場合、車椅子に対して前方に障害物があると判断できるので、その場で左旋回し障害物を回避する必要がある。

ここで車椅子の行動の定義をしておく。旋回とは、ジョイスティックを斜めに倒した時の行動で、例えば左旋回とは、緩やかに左に弧を描くように走行することである。またその場回転の左旋回とは、ジョイスティックを真左に倒した時の行動で、一旦停止した後その場で左旋回する行動のことである。

3.2 神経回路による制御

赤外線センサから得られる入力信号を、制御決定を行う神経回路への入力とし、神経回路による車椅子ロボットの制御を実現した。この研究で使用した電動車椅子は3.1節で述べたとおり、ジョイスティックに接続されている2本の信号線(*ye*, *bu*)により左右の車輪を制御している。これらの信号線と左車輪L, 右車輪Rとの関係を以下の式に示す。

$$x = \left(\frac{L - R}{2} \right), \quad y = \left(\frac{L + R}{2} \right) \quad (2)$$

この時、*x*は左右動作命令で、*y*は前後動作命令となる。ここで、車輪L, Rと車椅子の行動の対応図をFig.8に示す。

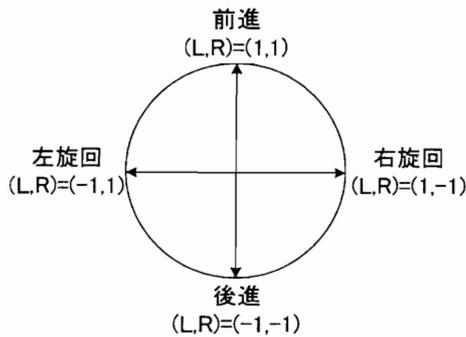


Fig.8 車椅子の車輪 L, R と行動

Fig.8において、1は車輪の順回転、-1は車輪の逆回転、0は停止という意味である。例えば、車椅子を前進させる場合L, Rとも順回転であり、後進させる場合はL, Rとも逆回転であるということを示している。

車輪L, Rを左右の車輪の速度、各センサ値 $x_0 \sim x_6$ を神経回路への入力値、 $W_{R1} \sim W_{R6}$ を右車輪制御に使用されるシナプス過重、 $W_{L1} \sim W_{L6}$ を左車輪制御に使用されるシナプス荷重とした時、左右の車輪の速度は以下の式で求められる。

$$R = f\left(\sum_{i=0}^6 W_{Ri} x_i + W_{R7}\right) \quad (3)$$

$$L = f\left(\sum_{i=0}^6 W_{Li} x_i + W_{L7}\right) \quad (4)$$

$$f(x) = \tanh(\omega x) \quad (5)$$

(3), (4)式は、古典パーセプトロンより線形分離を用いて最適値を求めることができる。

Table.3からL, Rそれぞれの回転速度をTable.4, Table.5のようなカルノー図に書き表し、L, Rのどつうの速度の範囲を1~-1と仮定して考える。

Table.4 Lの速度

| $X_0 X_1 \backslash X_2$ | 0 | 1 |
|--------------------------|----|----|
| 00 | 1 | 1 |
| 01 | 0 | 1 |
| 10 | -1 | -1 |
| 11 | -1 | -1 |

Table.5 Rの速度

| $X_0 X_1 \backslash X_2$ | 0 | 1 |
|--------------------------|---|---|
| 00 | 0 | 0 |
| 01 | 1 | 1 |
| 10 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | 1 |

次に、作成したカルノー図をFig.9のように図式化し、線形分離で最適値となる面を探し、面方程式をたてる。

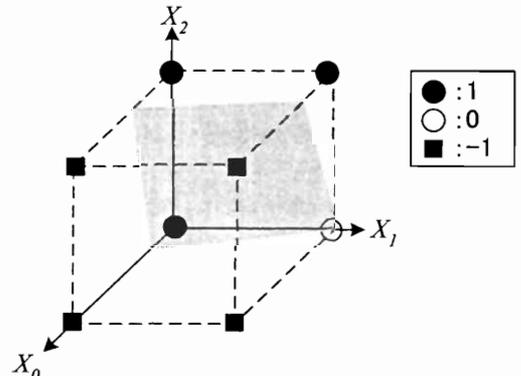


Fig.9 車輪 L の速度を線形分離した例

この線形分離によって(3), (4)式は、(6), (7)式に置き換えられ、センサ入力による車輪の速度制御が実現できた。

$$L = f(-4X_0 - X_1 + X_2 + 1) \quad (6)$$

$$R = f(X_1 + X_2) \quad (7)$$

4. 条件式による制御と神経回路による制御の比較実験

4.1 実験環境

工学部A棟2階の廊下で実験を行った。Fig.10に簡単な実験環境図を示す。

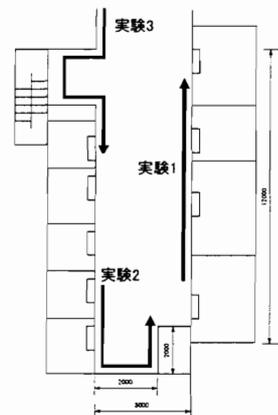


Fig.10 実験環境図

4.2 実験内容

Fig.10 に示す実験環境の下で、各検証場所による実験を行った。それぞれの実験内容は以下のとおりである。なお、今回は右側壁沿い走行および障害物回避について着目した結果を示すこととする。

- 実験 1: 直進時の検証を行う。
車椅子が、廊下の右側にある場合、中央にある場合、左側にある場合について、それぞれ右側壁沿い走行をするかどうか、また壁に衝突せずに走行できるかの実験。
- 実験 2: 曲がり角での検証を行う。
車椅子が前方の壁を認識し、壁に衝突せずに走行できるか、また、その場回転で障害物を回避する場合に滑らかに回転できるかの実験。
- 実験 3: 凹面での検証を行う。
車椅子が凹面に進入し、壁に衝突せずに抜け出すことができるかの実験。

4.3 実験結果

各実験で、条件式による制御と神経回路による制御についての比較実験を行った。

(1) 直進時での検証実験

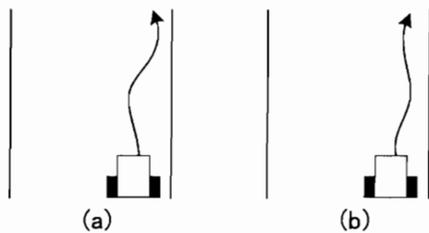


Fig.11 直進時での条件式による制御の場合(a)と神経回路による制御の場合(b)

(a), (b)とも出発時にやや左にそれる傾向があるものの、蛇行することなく滑らかに走行することができた。

(2) 行き止まり時での検証実験

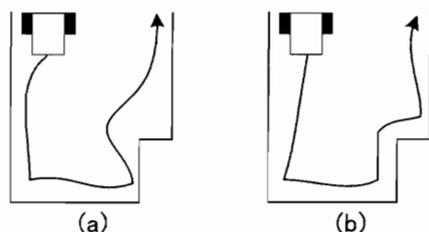


Fig.12 行き止まり時での条件式による制御の場合(a)と神経回路による制御の場合(b)

(a), (b)ともに右側壁沿い走行をして前方の壁を認識すると、その場回転で左旋回した。その後、前方のセンサの反応がなくなるので、直進行動をとるが、すぐに壁を認識し、再度その場回転で左旋回後右側壁沿い走行をした。車椅子は壁に衝突することなく角を回転した。また、神経回路による制御の方が滑らかに角を曲がり走行した。

(3) 凹面時での検証実験

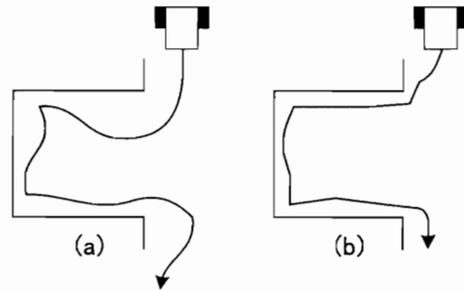


Fig.13 凹面時での条件式による制御の場合(a)と神経回路による制御の場合(b)

右側のセンサが壁を感知しなくなると、車椅子は右旋回を行った。多少の起伏は伴うものの、凹面に進入することができた。また、Fig.13 からわかるとおり、条件式による制御では、凹面に対して多少大回りしながら進入する傾向がみられたが、神経回路による制御では滑らかに凹面に進入することができた。

5. 結論

この研究において自立型車椅子ロボットを開発し、壁沿い走行および障害物回避走行を可能にした。条件式による制御と神経回路による制御での比較実験では、神経回路による制御の方がより滑らかに走行することがわかった。しかし実験環境の違いによる赤外線センサ値の変化や、車椅子が左にそれる傾向などの諸問題を解決していき、完成度の高い自立型車椅子ロボットへと発展していく必要があると思われる。

参考文献

- [1] 北里諭士, 「神経回路を用いた電動車椅子の自立化」, 平成 13 年度卒業論文
- [2] 松永製作所, 電動車椅子 MD-100 取扱説明書
- [3] Interface 社, 「Linux による PCI ボード・CompactPCI ボード制御入門書 Ver1.5」
- [4] SHARP 社, 電子デバイス-測距センサユニット http://www.sharp.co.jp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2d120_j.pdf
- [5] CQ 出版社, トランジスタ技術, 2001 年 8 月