

自動走行車両の自律的衝突回避

2006MI070 川瀬克 2006MI158 清水健貴

指導教員：大石泰章

1 はじめに

近年、愛知万博の警備ロボットや中部国際空港の掃除ロボットなどの自動ロボットを目にする機会が増えてきた。自動ロボットにおいて、障害物を感知した際に自律的に回避することは最も基本的で重要な機能の1つである。しかし、衝突回避にも様々な方法が考えられ、何らかの意味で最適な回避方法が望ましい。そこで我々は自動走行車両の実験機(Boe-Bot)を使用し、最適な回避方法の開発を目指す。

2 実験機について

2.1 実験機

今回使用する実験機は米国 Parallax 社¹の「Boe-Bot」である。Boe-Bot は左右一対の車輪を持ち、サーボモータで、それぞれの回転速度を変えることにより前進、後退、回転という動作を行う。Boe-Bot は前方にある赤外線 LED と赤外線検出器を使い、障害物の有無を検出することが出来る。雑音除去のため赤外線検出器には帯域フィルタが取り付けられており、赤外線が 38.0[kHz] で点滅する場合に最も感度が高くなるようになっている(図1)。またマイクロコントローラ Basic Stamp 2 を搭載し、プログラム言語 PBASIC を使うことで動作をプログラムすることができる。

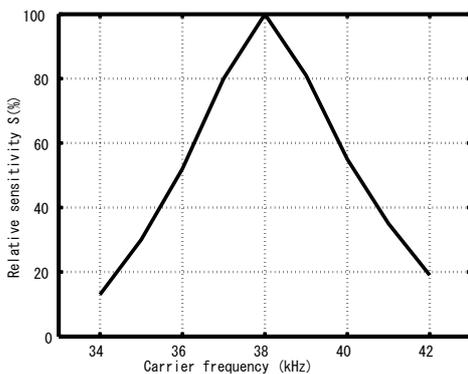


図1 周波数と検出器の感度 [1]

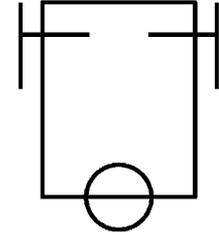
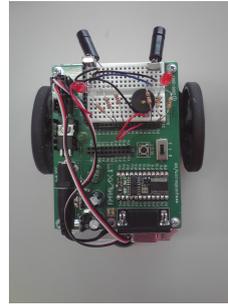


図2 Boe-Bot の写真 図3 Boe-Bot の簡易図

図2はBoe-Botを上から撮った写真である。上部が前であり、物体を認識するために使用する赤外線LEDと赤外線検出器が付いている。写真には写っていないが、後部には動力を持たない後輪がある。図3はBoe-Botの簡易図である。左右にある直線がBoe-Botの車輪を表しており、後部の円が、後輪を表している。以下Boe-Botを表す図は、図3のように書く。

2.2 モデル

実験機の動きをより明確にし、衝突回避法の適切さを客観的に議論するためにモデル化を行う。Boe-Botは左右それぞれの車輪の進行速度により進行方向、速度が決定する。車輪の進行速度は対応するサーボモータに加える指令信号のパルス幅により決まる。本節では、まずパルス幅と車輪の進行速度との関係をモデル化し、次に車輪の進行速度とBoe-Botの運動との関係をモデル化する。

最初にサーボモータに加えるパルス幅と車輪の進行速度の関係をモデル化する。両者の関係を実験によって求め、折れ線で近似すると以下ようになる。すなわち、 v_L [m/s]は左車輪の進行速度、 v_R [m/s]は右車輪の進行速度、 p [ms]はパルス幅を表すするとき、左車輪について、

$$\begin{aligned} v_L &= -0.155 \quad (p < 1.39), \\ v_L &= 1.40p - 2.1037 \quad (1.39 \leq p \leq 1.61), \\ v_L &= 0.155 \quad (p > 1.61) \end{aligned}$$

であり、右車輪について、

$$\begin{aligned} v_R &= -0.155 \quad (p > 1.61), \\ v_R &= -1.40p + 2.1037 \quad (1.39 \leq p \leq 1.61), \\ v_R &= 0.155 \quad (p < 1.39) \end{aligned}$$

である。図4は実際の車輪の進行速度とパルス幅の関係に近似式の折れ線を重ね合わせたものである。図4の実線は左車輪、破線は右車輪の近似式である。

¹<http://www.parallax.com>

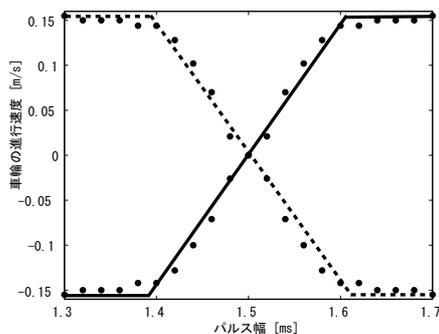


図 4 パルス幅と進行速度の関係．実線は左車輪，破線は右車輪を表す．

次に各車輪の進行速度と Boe-Bot の運動との関係を考える．Boe-Bot を (x, y) 平面上で考える，Boe-Bot の車軸の中心の座標を (x, y) ，Boe-Bot の向きを x 軸正方向を基準に反時計まわりを正として測った角度を θ とする (図 5)．このとき，Boe-Bot の状態は (x, y, θ) で表される．

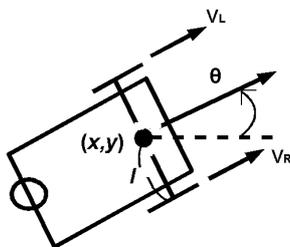


図 5 Boe-Bot の状態

左の車輪の進行速度 v_L ，右の車輪の進行速度 v_R に対して，Boe-Bot の状態 (x, y, θ) の変化は次のように表される:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_R + v_L}{2} \cos \theta \\ \frac{v_R + v_L}{2} \sin \theta \\ \frac{v_R - v_L}{2l} \end{pmatrix}.$$

3 衝突回避のアルゴリズムについて

Boe-Bot の衝突回避において，問題設定と回避方法が重要となる．そこで赤外線検出器の反応距離を考慮し問題設定を行い，それを踏まえて回避方法について考える．

3.1 問題設定

今回の実験に使用する障害物は，直径 0.10[m]，高さ 0.12[m] の円柱とする．赤外線検出器が最も安定して反応する周波数は 38.0[kHz] であり，その反応距離は 0.30-0.35[m] である．Boe-Bot の赤外線検出器は障害物の有無は判別出来るが，障害物の大きさ

を判別することは出来ない．以上をふまえて，次の条件のもとで衝突回避を行うことにする (図 9)．

1. Boe-Bot の初期状態 (x, y, θ) を $(-0.50, 0, 0)$ とし，障害物を原点に置く．
2. 途中 $(0, 0.12, 0)$ の状態を経由する．
3. Boe-Bot の状態が $(0.50, 0, 0)$ になったとき回避が終了したものとする．

3.2 回避方法

Boe-Bot の基本的な回避方法は左右の車輪の進行速度を変えることで行う．この時，各車輪の進行速度の変え方により Boe-Bot は様々な回避方法をとれる．各車輪の進行速度の変わり方はサーボモータに加える指令信号のパルス幅の変え方によって変わる．ここで，左のサーボモータに加えるパルス幅を p_L [ms]，右のサーボモータに加えるパルス幅を p_R [ms]，時間を t [ms] とする． k を正の値のパラメータとし，後にこの値を適切に選ぶことで，回避方法の最適化を行う．

回避方法について問題設定に即して説明する．以下に示す図 6 は Boe-Bot が障害物を感知してから $y = 0.12$ となるまでのパルス幅の変化と時間の関係を示したものである．図 7 はパルス幅が図 6 のように変化した際の左右の車輪の進行速度と時間の関係を示している．図 8 は，左右の車輪が図 7 のように変化した際の y 座標の変化を示している．図 6，図 7 において実線が左サーボモータへ与えるパルス幅の変化及び左車輪の進行速度の変化，破線が右サーボモータへ与えるパルス幅の変化及び右車輪の進行速度の変化である．

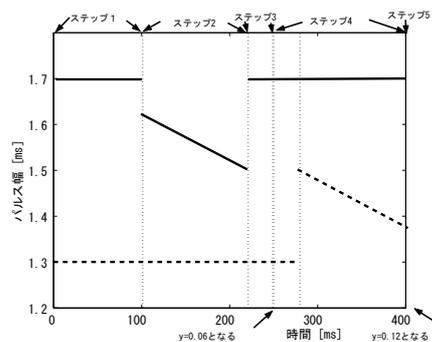


図 6 時間とパルス幅の関係

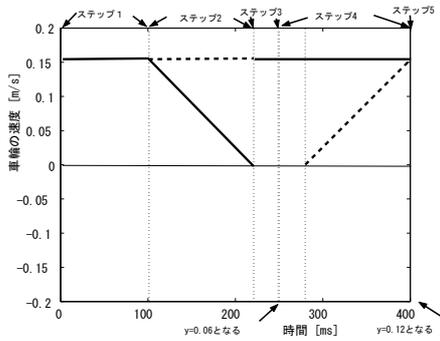


図 7 時間と左右の車輪の進行速度の関係

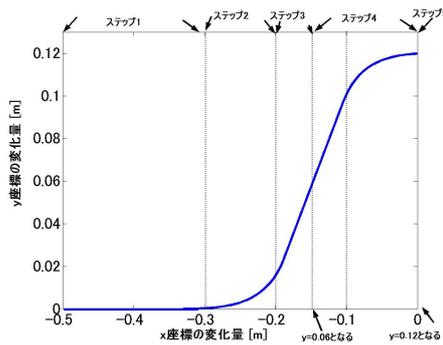


図 8 時間と y 座標の変化の関係

ここで、回避方法を 5 つのステップに分ける。
 ステップ 1．初期状態 $(-0.50, 0, 0)$ から障害物を感知するまでのパルス幅をそれぞれ

$$p_L = 1.70,$$

$$p_R = 1.30$$

とする (図 6)．このとき左右の車輪の進行速度は $0.155[m/s]$ である (図 7)．そのため、障害物を感知するまでは前進する (図 8)．

ステップ 2．障害物を感知した時間を t_1 とし、障害物を感知してから左右のパルス幅をそれぞれ

$$p_L = 1.61 - k(t - t_1),$$

$$p_R = 1.30$$

とする (図 6)．このとき左車輪の進行速度は $0.155[m/s]$ から次第に遅くなるが、右車輪の進行速度は $0.155[m/s]$ のままなので (図 7)、左に曲がりながら前進する (図 8)．

ステップ 3． $y = 0.06$ となる前に $p_L = 1.50$ となったら、パルス幅を

$$p_L = 1.70,$$

$$p_R = 1.30$$

と設定する (図 6)．そのため左右の車輪の進行速度は $0.155[m/s]$ となり (図 7)、Boe-Bot は向き θ が一

定のまま前進する (図 8)．

ステップ 4． $y = 0.06$ になったら、左車輪の進行速度はステップ 2、ステップ 3 の右車輪の進行速度の変化を逆にたどるようにし、右車輪の進行速度はステップ 3 の左車輪の進行速度の変化を逆にたどるようにする。(図 6, 図 7, 図 8)．

ステップ 5．状態が $(0, 0.12, 0)$ になったら、ステップ 1, 2, 3, 4 の間に Boe-Bot がたどった軌跡と y 軸に対して対称な軌跡をたどるように左右のモータに適当なパルス幅を与える．

障害物を回避の様子を図 9 に示す．図 9 における L は障害物を感知してから状態が $(0, 0.12, 0)$ になるまでの x 座標の変化量である．

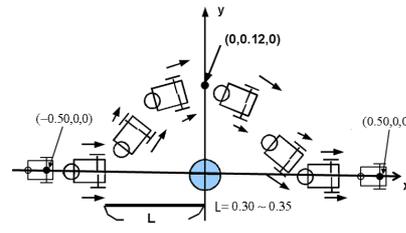


図 9 衝突回避の様子

3.3 回避方法の評価法

回避方法の評価法は様々ある．回避角の大きさで評価する方法や回避距離の大きさで評価する方法等である．その中で我々は初期状態 $(-0.50, 0, 0)$ から目標状態 $(0.50, 0, 0)$ に到達するまでの時間で評価することにする．3.3 節の回避方法に含まれる正のパラメータ k は、シミュレーションを行い所要時間が最小になるように決めることにする．

4 パラメータ k の選択

2 節のモデルを使ってシミュレーションを行い、3.3 節の方法で障害物の回避を行うとき、初期状態から目標状態に到達するまでの時間が最も小さくなるようにパラメータ k を定める．3.3 節の回避方法はパルス幅の変化の割合 k を定めることで決定する．

4.1 パラメータ k の範囲

パラメータ k の範囲を決めるにあたって、赤外線検出器が障害物を感知する距離が $0.30 - 0.35[m]$ の間であることに注意する．このことから、図 9 における L が $0.30 - 0.35[m]$ でなければならないことがわかる．様々な k の値に対してシミュレーションで求めた L の値を表 2 に示す．これにより、 L が $0.30 - 0.35[m]$ となる k の範囲は $0.90 \times 10^{-3} \leq k \leq 1.3 \times 10^{-3}$ であることがわかる．

表 1 パラメータ k の値と距離 L [m] との関係

k の値	L [m]
0.80×10^{-3}	0.36
0.90×10^{-3}	0.34
1.0×10^{-3}	0.33
1.1×10^{-3}	0.32
1.2×10^{-3}	0.31
1.3×10^{-3}	0.34
1.4×10^{-3}	0.36

4.2 パラメータ k の最適化

4.1 節で求めた k の範囲のうちで最も所要時間が短い k の値をシミュレーションによって求める。シミュレーションによって求めたパラメータ k の値と回避時間の関係を図 10 に示す。

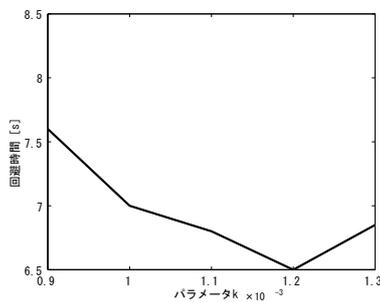


図 10 パラメータ k と回避時間の関係

図 10 より、求める k の値は $k = 1.2 \times 10^{-3}$ である。 $k = 1.2 \times 10^{-3}$ における Boe-Bot の軌跡は図 11 のようになる。

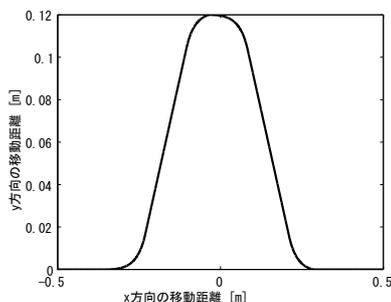


図 11 Boe-Bot の軌跡

5 実機実験

実機を使って 3.3 節の回避方法を実行し、計測する。実験ではストップウォッチを使用し、時間を計測する。計測誤差の影響を少なくするために計測を 20 回行い、平均をとる。この時の平均時間をパラメータ k の計測時間とする。図 12 はパラメータ k の値に対する計測時間の変化をグラフにしたものである。

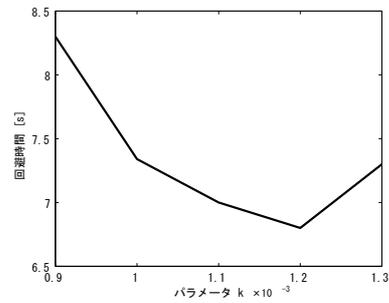


図 12 パラメータ k と計測時間の関係

図 12 において、回避時間が最小の k の値は $k = 1.2 \times 10^{-3}$ の時である。この時の軌跡を図 13 に示す。

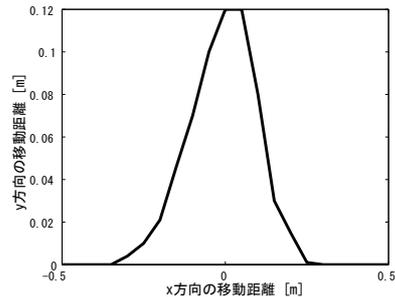


図 13 Boe-Bot の軌跡

実機実験の結果、シミュレーションで描いた軌跡に近い軌跡が得られた。パラメータ k の値もシミュレーションと一致した。

6 おわりに

本研究の成果として、以下のことが挙げられる。

- 自動走行車両のモデル化を行った。
- モデルに基づいて実機に対して適切な回避方法が得られた。
- シミュレーションと実験機の実験結果から、自動走行車両における衝突回避時間が最小となるパラメータ値を発見出来た。

今後の課題は以下の通りである。本研究では障害物が停止した場合のみを扱っており、動的障害物の場合は扱っていない。これは、動的障害物に対して実機実験を行うと赤外線検出器が反応する距離が極めて近く、また、場合によっては衝突してしまうため問題設定が行えなかったからである。今後、動的障害物において赤外線検出器の反応距離を安定させ、問題設定が出来れば、動的障害物における衝突回避も扱えるであろう。

参考文献

- [1] A. Lindsay: *Robotics with the Boe-Bot: Student Guide*, ver. 2.2. Parallax Inc., 2003–2004.