

狭小屈曲通路における自立走行車の制御アルゴリズム構築

橋本雅文*

1. はじめに

狭い空間内を障害物を回避しながら走行する機能を移動ロボットに装備することは、その安全性を確保する上で重要である。これを実現するには、通常は人間が与えた動作指令により走行するものの、周囲環境の様子を車載センサにより認識して、障害物との衝突の危険性がある場合にはロボット自らが動作指令を修正して回避動作を行う「環境センシング機能」と「障害物回避制御機能」を装備したセンサベースなロボットを構築する必要がある。

それを実現する基礎研究として、本報告では、壁に囲まれた廊下環境を対象に、車載のレーザレンジセンサにより壁を認識して、壁との衝突を避けながら壁に沿って走行する制御システムを設計する。

2. 制御システムの概要

本研究では、移動ロボットとして車椅子や作業車両のように、通常はハンドルやジョイスティックなどの操作デバイスにより人間が与えた動作指令により走行するものの、状況に応じてロボット自らが自律的な動作を行う半自律型（セミオート型）のロボットを想定する。

図1をもとに廊下環境でのロボット走行制御法の概要を以下に示す。

①操作デバイスによる手動制御

操作者は操作デバイスによりロボットに動作指令を直接、指示して走行させる。

②センサによる周囲環境の認識

ロボットは走行中、センサにより周囲を監視し、左右の壁の認識と壁までの距離を計測する。

③自動制御による壁沿い走行

ロボットが壁に接近し、壁からの所定の距離内に入ると制御モードを手動から自動制御に自律的に切り替える。そして、ロボット自らが壁と衝突しないよう壁に沿って走行する。

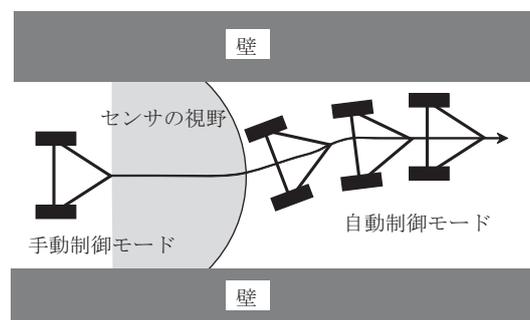


図1 走行制御の様子

3. 実験用ロボットと環境認識センサ

実験に使用した移動ロボット（電動車椅子）の外観を図2に示す。ロボットは車体の左右にそれぞれ独立駆動可能な駆動輪を持ち、ジョイスティックにより操作する。内界センサとしては、各車輪に速度計測用レゾルバ、車体には旋回速度計測用のジャイロを備えている。また、環境をセンスする外界セン

サとして2次元LRS（SICK社LMS200）を車体前部に設けている。

LRSにより水平面内において0.5[deg]（方位分解能）ごとにパルスレーザ光を発射し、Time-of-flight法により障害物までの距離を計測できる。視野角はLRS前面180[deg]、距離測定範囲は最大8.1[m]である。LRSのスキャン周波数は75[Hz]であるが、LRSとコンピュータ間の通信や処理時間の制約により、実際のデータ取得周波数は約10[Hz]である。なお、最近、SICK社LMS200よりも安価で視野角が240[deg]のLRS（URG-04LX）が北陽電機社より販売されている。



図2 電動車椅子

4. 壁の検出

走行環境として単純な壁（平面）で囲まれた廊下環境を考える。2次元LRSにより水平方向に周囲環境を観測したとき、平面を観測した場合は図3に示すように、レーザ観測点（角度分解能ごとに得られる距離計測点）は一直線上に並ぶ。このことを利用して、レーザ観測点の中から直線上に並ぶ観測点を抽出して平面を特定する。

レーザ観測点から直線部を抽出するアルゴリズムを次に述べる。LRSにより平面を観測の様子を図3に示す。いま、方位角 $\theta_k (=k\Delta\theta)$ 、 $\Delta\theta$ はLRSの方位分解能0.5 [deg] の距離データを r_{2k} 、方位角 θ_{k-1} での距離データを $r_{1k} (=r_{2k-1})$ と表すと、幾何学的に次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} r_{2k} \\ r_{1k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_{1k-1}r_{2k-1}}{2r_{1k-1}\cos\Delta\theta - r_{2k-1}} \\ r_{2k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta r_{2k} \\ \Delta r_{1k} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、右辺第2項は誤差である。

式(1)を次式のようにベクトル表記する。

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{f}(\mathbf{r}_k) + \Delta\mathbf{r}_k \quad (2)$$

平面を観測する場合は $\mathbf{r}_k = \mathbf{f}(\mathbf{r}_k)$ が厳密に成立するため、誤差項 $\Delta\mathbf{r}_k$ は小さく、非平面物体の観測に対しては $\mathbf{r}_k = \mathbf{f}(\mathbf{r}_k)$ が厳密に成立しないために $\Delta\mathbf{r}_k$ は大きくなる。そこで、 $\Delta\mathbf{r}_k$ の共分散 \mathbf{Q}_k の大きさにより式(2)を2つのモデルに分類する。

・平面モデル： $\mathbf{r}_k = \mathbf{f}(\mathbf{r}_k) + \Delta\mathbf{r}_k^1$ (3)

・非平面モデル： $\mathbf{r}_k = \mathbf{f}(\mathbf{r}_k) + \Delta\mathbf{r}_k^2$ (4)

ただし、 $\mathbf{Q}_k^2 \gg \mathbf{Q}_k^1$ 。

他方、LRSの観測モデルは以下となる。

$$z_k = r_{2k} + \Delta z \quad (5)$$

式(3)~(5)をもとにIMM (Interacting Multiple Model) 法⁽¹⁾を適用して平面モデルの生起確率を求める。そして、それが大きいレーザ観測点を知ることによってLRSが平面物体を観測しているか否かを認識する⁽²⁾⁽³⁾。

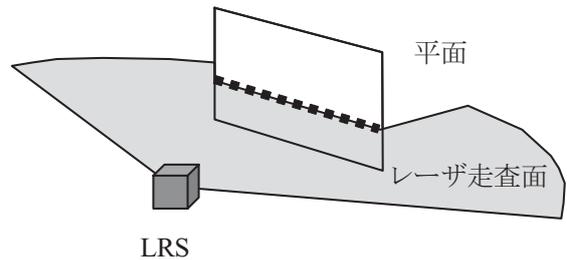


図3 LRSによる平面の観測

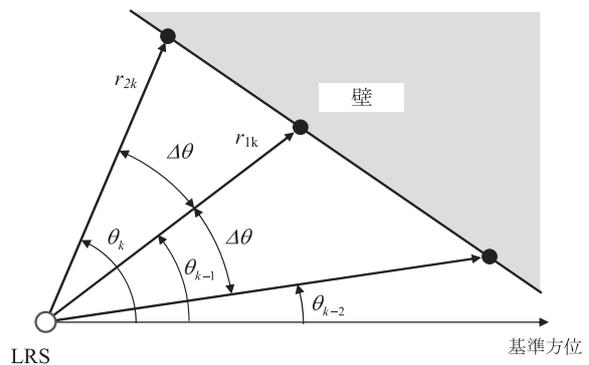


図4 平面に対するレーザ観測点

具体例を図5, 6をもとに述べる. 図5 (a)の環境にLRSを設置し, 取得した情報を(b)に示す. それらの情報をもとにIMM法を適用して平面モデルの生起確率を求めた結果を図6に示す. 図6よりLRSが壁1, 2, 3を観測している場合は生起確率が高く, 壁1から2へ観測が推移するとき, 壁2から3へ推移するときには生起確率が小さくなるのが分かる. このように, 平面モデルの生起確率が高いレーザ走査角を知ることで壁の存在が分かる.

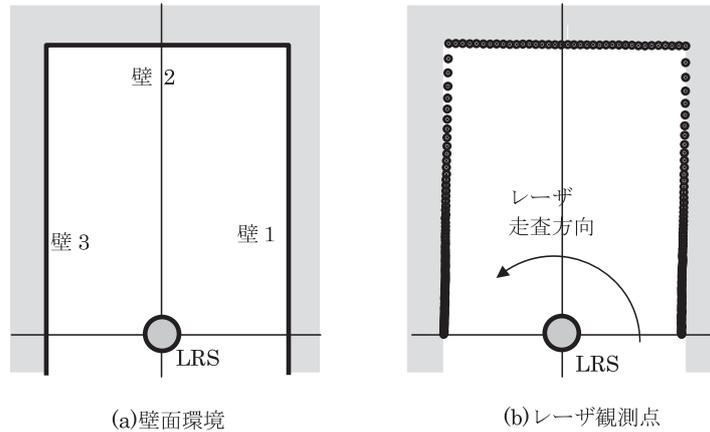


図5 壁面環境とLRSのレーザ観測点 (上面図)

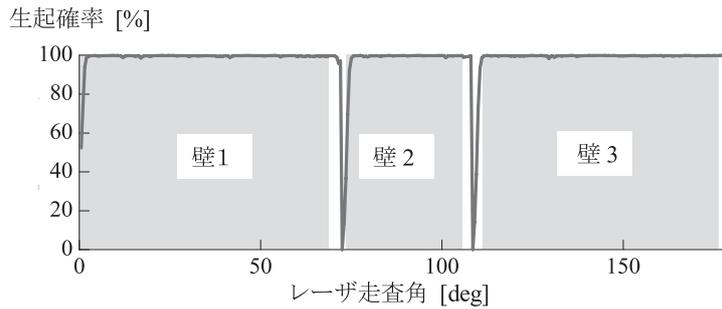


図6 平面モデルの生起確率

5. 壁面に沿った移動制御

前章での方法により平面 (壁) が抽出でき, 壁面までの距離 y_{wall} が計測できる (図7). そこで, 壁に接近した場合は壁と衝突しないよう, 壁より距離 y^* 離れた壁に平行な仮想経路に沿ってロボットを走行させる.

左右独立駆動輪タイプのロボットにおいて, 右車輪の対地速度を v_1 , 左車輪の対地速度を v_2 , トレッド長を L , 車体の速度を v , 回転速度を $\dot{\theta}$ とすると以下の関係式が得られる.

$$\begin{cases} v = \frac{v_1 + v_2}{2} \\ \dot{\theta} = \frac{v_1 - v_2}{L} \end{cases} \quad (6)$$

ロボットの進行距離を S , 仮想経路に対するロボットの横偏差を ${}^d y$, 方位を ${}^d \theta$ とすると, ロボットの運動学より次式が得られる⁽⁴⁾.

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} {}^d y \\ \sin {}^d \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^d y \\ \sin {}^d \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (7)$$

ただし, $u = \cos {}^d \theta \frac{d\theta}{ds}$.

ロボットを仮想経路に追従させる (${}^d y \rightarrow 0$, ${}^d \theta \rightarrow 0$) ための制御アルゴリズムを次式とする.

$$u = -K_1 {}^d y - K_2 \sin {}^d \theta \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入すると,

$$\frac{d^2 {}^d y}{ds^2} + K_2 \frac{d {}^d y}{ds} + K_1 {}^d y = 0 \quad (9)$$

となることから, $K_1 > 0$, $K_2 > 0$ のとき, 任意の初期値 ${}^d y$ に対して ${}^d y \rightarrow 0$ が実現できる. ${}^d y \rightarrow 0$ となるロボットの目標旋回速度 $d\theta^*/dt$ は, $u = (\cos {}^d \theta) d\theta/ds$ より

$$\dot{\theta}^* = v^* \left\{ \frac{-1}{\cos {}^d \theta} (K_1 {}^d y + K_2 \sin {}^d \theta) \right\} \quad (10)$$

ただし, v^* はロボットの目標速度.

であることと, 式(6)に留意すると, ${}^d y \rightarrow 0$ を実現する左右車輪の目標速度は次式で求まる.

$$\begin{cases} v_1^* = v^* \left[1 + \frac{L}{2} \left\{ \frac{-1}{\cos {}^d \theta} (K_1 {}^d y + K_2 \sin {}^d \theta) \right\} \right] \\ v_2^* = v^* \left[1 - \frac{L}{2} \left\{ \frac{-1}{\cos {}^d \theta} (K_1 {}^d y + K_2 \sin {}^d \theta) \right\} \right] \end{cases} \quad (11)$$

6. 実験

図8に示すように, ロボットの進行方向に向かって左側に擬似的な壁面を設け, それに沿って速度 0.2[m/s]で走行させる実験を行った. 走行中に得られるLRSの観測値の一例 (90スキャン目の観測値) を図9(a)に示す. それら観測値をもとに壁面抽出した結果を図9(b)に示す. また, 図10にロボットの走行軌跡を示す. 以上の実験により, 壁面が適切に抽出でき, ロボットが壁に沿って安全に走行できていることが分かる.

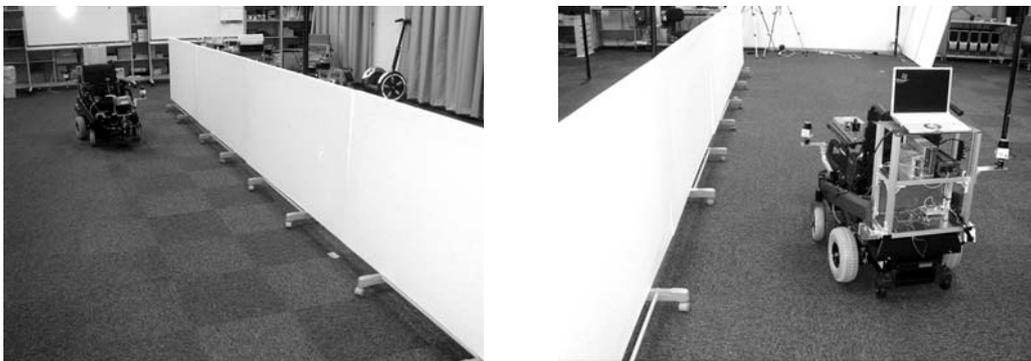


図8 実験環境

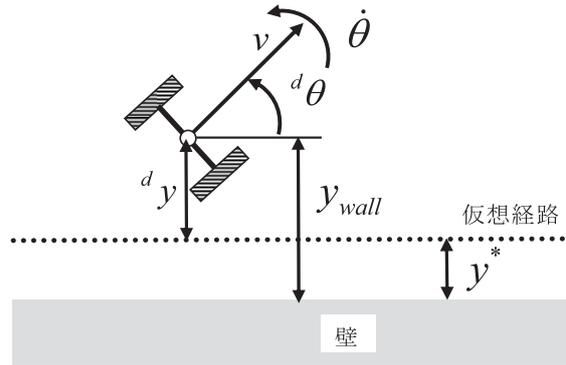


図7 壁に沿った走行制御

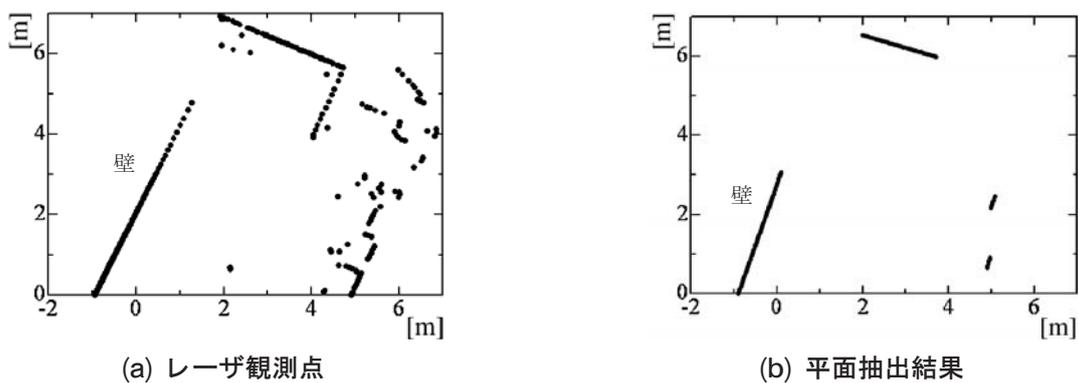


図9 レーザ観測点と平面抽出結果

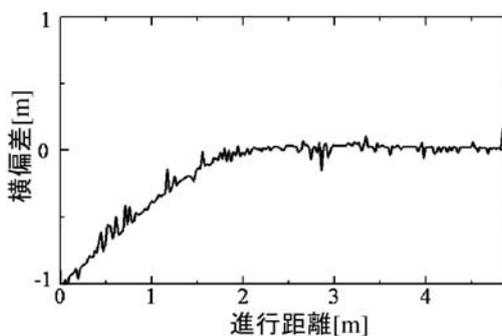


図10 ロボットの走行軌跡

7. おわりに

本報告では、廊下環境を走行する半自律型移動ロボットに対して、レーザレンジセンサにより壁を認識して壁との衝突を避けながら安全に走行する制御系を設計した。現時点では、極限られた廊下環境のみでの適用が可能のため、今後はより一般的な環境（多くの障害物が存在する煩雑な環境）に対して安全に走行する制御系を構築する必要がある。

参考文献

- (1) H.A.P.Blom, and Y.Bar-Shalom, “The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficient”, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 33-8, pp. 780-783 (1988)
- (2) 橋本雅文, 又平知也, 劉 煥軍, 大場史憲, “レーザレンジファインダによる屋内移動ロボットの自己位置推定法”, アドバンティ2002シンポジウム講演論文集, pp.12-13(2002)
- (3) 橋本雅文, 渡辺真志, 大場史憲, 岡田三郎, “電動車椅子の内界センサ系の故障診断と安全走行制御”, 第23回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, CD-ROM (2005)
- (4) 又平知也, 橋本雅文, 濱咲真哉, 大場史憲, “移動ロボットの同軸走行制御に関する研究”, 日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画徳島地方講演会講演論文集, pp.181-182 (2000)