

非ホロノミック移動体の形状を考慮した 実用的な障害物回避*

— ポテンシャル法の長方形車体への適用 —

関 啓明** 柴山 智志*** 神谷 好承** 疋津 正利**

Practical Obstacle Avoidance for a Nonholonomic Vehicle Considering Its Shape
—Application of Potential Field to Rectangular Body—

Hiroaki SEKI, Satoshi SHIBAYAMA, Yoshitsugu KAMIYA and Masatoshi HIKIZU

A fast obstacle avoidance algorithm based on sensor data is required for an autonomous vehicle to move at high speed. When a vehicle is nonholonomic and it has polygonal body, the method using configuration space is usually applied to such a vehicle. But, it is complex and it needs much computing power. On the other hand, artificial potential field is often used for real-time obstacle avoidance, however, most of them consider a vehicle as an omnidirectional movable point.

Therefore, we propose a new method of practical obstacle avoidance for a nonholonomic vehicle with rectangular body. Application points of repulsive forces from obstacles are located in both the front and rear of vehicle's body. Their forces are generated according to the distances between obstacle and vehicle's body. Rear forces are transferred to the front by inverting and the resultant force moves the vehicle. This idea is very simple and its effectiveness has been shown by simulation.

Key words: obstacle avoidance, nonholonomic vehicle, local path planning, potential field, collision free path

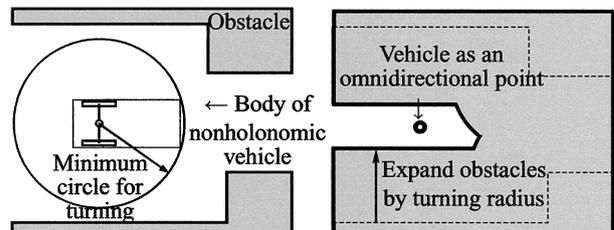
1. 序 論

移動ロボットに代表される自律的な移動体にとって、障害物回避は重要な機能である。本研究では、自律電動車いす(図1)のような独立2輪駆動の非ホロノミックな移動体について、車体形状を考慮した障害物回避を考える。移動体を全方向移動可能な質点とみなせる場合には、従来から数多くの研究が行われ、様々な手法が提案されている。人工ポテンシャル法¹⁾²⁾、グラフ理論³⁾、数値計画法⁴⁾などを用いて、比較的容易に、障害物回避する経路を計画したり移動体を走行制御したりすることができる。運動方向が拘束される非ホロノミックな移動体であっても、車体形状を2つの車輪の中心を中心とする円形で近似すれば、全方向移動可能な質点の問題に帰着できる。すなわち、図2のように、その円の半径分、障害物や環境を拡大させ、移動体の車体を1点に収縮させればよい。しかし、自律電動車いすのような車体は円形近似しにくい。また、車体を含む、車輪の中心を中心とする円はかなり大きくなり、元の車体形状ならば通過できるような狭い場所が通過できなくなってしまう。なお、非ホロノミックな移動体を質点とみなすものの、運動は自由ではなく、何らかの運動拘束条件下で、障害物を回避する経路を探索する研究もある⁵⁾⁶⁾。しかし、これらの研究では、移動体の車体形状を陽には考慮していない。

移動体の車体形状を考慮して経路計画を立てるとき、全方向移動可能な移動体ならば、コンフィギュレーション空間が利用できる⁷⁾。障害物に車体が衝突しない位置姿勢の集合を3次元のコンフィギュレーション空間で表現し、その中で位置姿勢の経路を探索すればよい。この問題もピアノムーバ問題⁸⁾として数多くの研究で扱われている。非ホロノミックな移動体の車体形状を考慮した経路計画の研究もいくつか見られる⁹⁾。コンフィギュレーション空間の中で、運動の拘束条



Fig. 1 Autonomous wheelchair moving through a narrow space



(a) Before expanding obstacles (b) After expanding obstacles

Fig. 2 Approximation of vehicle's shape by a circle for path planning

* 原稿受付 平成 19 年 8 月 28 日
** 正 会 員 金沢大学大学院 (石川県金沢市角間町)
*** 学生会員 金沢大学大学院

題⁸⁾として数多くの研究で扱われている。非ホロノミックな移動体の車体形状を考慮した経路計画の研究もいくつか見られる⁹⁾。コンフィギュレーション空間の中で、運動の拘束条

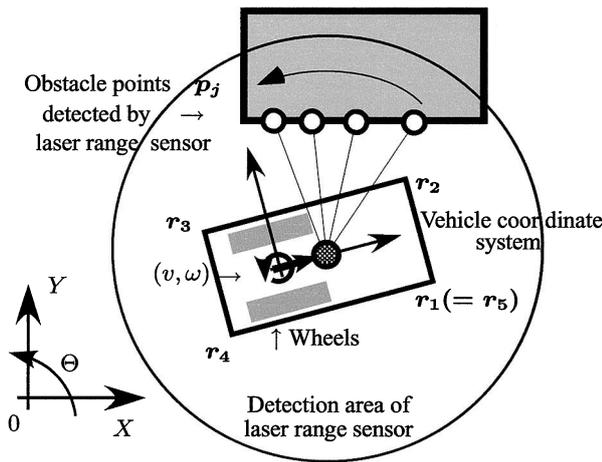


Fig. 3 Model of nonholonomic vehicle with laser range sensor

件を入れて経路を探索することは非常に難しい問題であるが、運動の拘束がないと仮定して得られた経路を、運動の拘束を満たすように修正する方法で解決している¹⁰⁾。あるいは、コンフィギュレーション空間をセルに分割し、直進・回転・幅寄せなどの単純な動作で到達できるセルの関係をグラフで表して、障害物との干渉をチェックしながらそのグラフを探索する方法もある¹¹⁾。いずれにせよ、実際の自律移動体に実装して、センサ情報からリアルタイムに障害物回避を行うことを考えると、これらの方法は経路の解が保証されるものの、複雑過ぎる。特に、コンフィギュレーション空間を求める処理は計算コストが大きい。さらに、実用的なシステムでは、大域的な経路は与えられており、その上で、素早い局所的な障害物回避が求められることも多い。

そこで、本研究では、環境や障害物の局所的なセンサ情報から、非ホロノミックな移動体の車体形状を考慮して、リアルタイムに局所的な障害物回避を行う実用的な方法を提案する。その際、車体形状は長方形を対象とし、基本的には、計算コストが少ないポテンシャル法を応用する。

2. 問題設定

次のような前提条件で、移動体の車体形状を考慮した障害物回避問題を考える(図3)。

- (1) 平面上を動く独立2輪駆動型の非ホロノミックな移動体を対象にする。基準座標系上で、移動体(2つの車輪を結ぶ中点)の位置姿勢を $\mathbf{R} = (X, Y, \Theta)^T$ とする。移動体が、離散時間 Δt の間、速度・角速度 $(v, \omega)^T$ で動いたときの位置姿勢の変化は、近似的に次式に従う。すなわち、角度 $\omega \Delta t$ 、長さ $v \Delta t$ の円弧上を動くため、 Δt 前後の位置姿勢に記号 $n-1, n$ をつけて表すと、

$$X_n = X_{n-1} + v \Delta t \cos(\Theta_{n-1} + \frac{\omega \Delta t}{2}) \quad (1)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + v \Delta t \sin(\Theta_{n-1} + \frac{\omega \Delta t}{2}) \quad (2)$$

$$\Theta_n = \Theta_{n-1} + \omega \Delta t \quad (3)$$

- (2) 移動体の車体形状は、長方形(あるいはそれに近い凸形状)とする。2つの車輪の中心に移動体座標系をとり、頂点の位置ベクトルを $\mathbf{r}_i (i = 1, 2, \dots, n_r)$ とする。
- (3) 周囲の環境や障害物の形状を検出するためのセンサとし

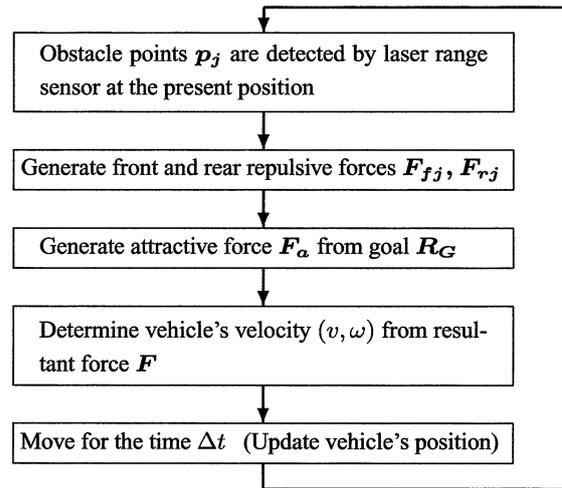


Fig. 4 Flowchart of proposed algorithm for obstacle avoidance

て、レーザ距離センサを使用する。この距離センサをある角度おきに走査して得られた障害物の輪郭上の点(移動体座標系上)を $\mathbf{p}_j (j = 1, 2, \dots, n_p)$ とし、これを「障害物点」と呼ぶことにする。なお、距離センサには測定範囲(移動体の中心からある半径の円領域)を設ける。

- (4) 大域的な経路は、別の高次の方法で解かれたり、ユーザから与えられたりするものとする。すなわち、比較的近い目標位置姿勢 $\mathbf{R}_G = (X_G, Y_G, \Theta_G)^T$ が与えられた上で、局所的な障害物回避経路を生成する。また、目標位置姿勢を基準にして、現在位置が目標の後方にある場合、すなわち、前進して目標に達する場合を説明する。後進の場合には、車体の前後を逆にして経路を生成すればよい。

3. ポテンシャル法による障害物回避アルゴリズム

移動体の車体形状(長方形)を考慮したポテンシャル法により局所的な障害物回避を行う方法を提案する。その基本的な手順を図4に示す。ポテンシャル法は、目標位置から引力を、障害物から斥力を、移動体に作用させて、その合力の方向に進ませるのが基本である。提案する方法が基本と大きく違うのは、次の2点である。

- 独立2輪駆動型の移動体は真横に寄れないという性質を考慮するため、車体の前後に力の作用点を設けて、そこに障害物点からの斥力や目標からの引力を作用させる。そして、それらの力は、2つの車輪間の中心を支点とする「てこ」のように扱う。
- 車体形状を考慮するため、障害物からの斥力の大きさを、障害物点から車体までの距離に関係づける。

この方法は、ポテンシャル法へ、移動体の運動拘束や車体形状に関する考慮を、非常に簡単に導入することができている。計算コストを考えても、力の作用点を2つに分けて、障害物点から車体までの距離を求める処理は、作用点を1つにして、障害物点から作用点までの距離を求める処理と、あまり変わらないことから、通常のパテンシャル法と同等であると言える。また、距離センサの情報(障害物点)を直接利用する方法であり、リアルタイムの計算が可能である。逆に、定性的には通常のパテンシャル法と変わらないことから、複数の障害物

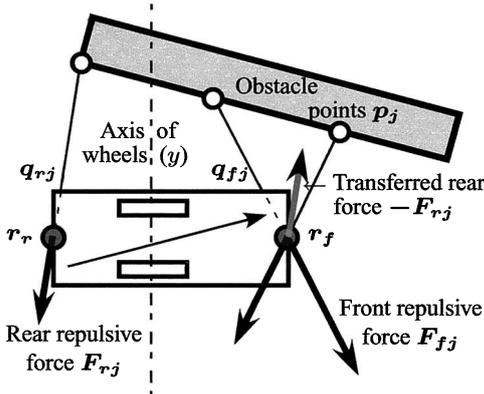


Fig. 5 Generation of repulsive forces from obstacle points

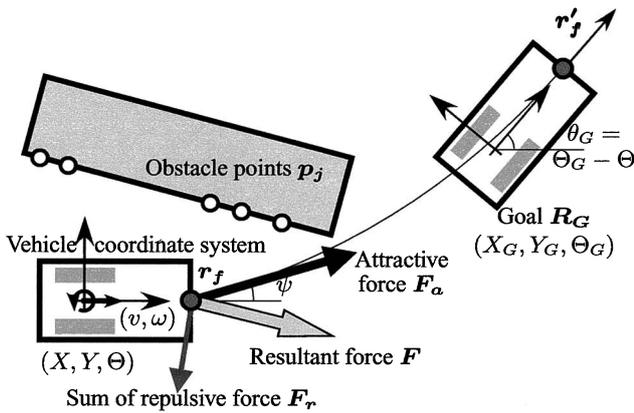


Fig. 6 Generation of attractive force and determination of velocity for obstacle avoidance

に囲まれるような環境でローカルミニマムに陥る可能性があるなどの欠点も持つ。

以下に、各々の作用力の求め方を詳述する。図5や図6のように、移動体座標系上で考える。力の作用点は、車体形状の前方と後方の先端にとる。それぞれ $\mathbf{r}_f = (x_f, 0)^T$, $\mathbf{r}_r = (-x_r, 0)^T$ とおく。必ずしも、作用点を車体の外周上にとらなければならないわけではないが、最終的には、その作用点にかかる合力の方向に車体を引っ張って動かすことになるため、車輪から離れた所にとる方が、移動体の運動が安定である。また、作用点を車体の外周にとると、障害物点から車体までの距離を求める計算が容易になる。次に、検出された障害物点 \mathbf{p}_j が、2つの車輪を結ぶ直線 (y 軸) より前方にある場合には、前方の力の作用点に、後方にある場合には、後方の力の作用点に障害物点からの斥力を発生させる。斥力の大きさは、障害物点から車体までの距離の2乗に反比例させる。すなわち、障害物点 (移動体座標系上) $\mathbf{p}_j = (p_{jx}, p_{jy})^T$ に対する前方と後方の斥力 \mathbf{F}_{fj} , \mathbf{F}_{rj} は、障害物点から前後の力の作用点 $\mathbf{r}_f, \mathbf{r}_r$ に向かう線分が、車体外形の線分と交わる点を、それぞれ \mathbf{q}_{fj} , \mathbf{q}_{rj} とすると、

$$\mathbf{F}_{fj} = \frac{K}{|\mathbf{q}_{fj} - \mathbf{p}_j|^2} \frac{\mathbf{r}_f - \mathbf{p}_j}{|\mathbf{r}_f - \mathbf{p}_j|}, \quad \text{if } p_{jx} > 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{rj} = \frac{K}{|\mathbf{q}_{rj} - \mathbf{p}_j|^2} \frac{\mathbf{r}_r - \mathbf{p}_j}{|\mathbf{r}_r - \mathbf{p}_j|}, \quad \text{if } p_{jx} < 0 \quad (5)$$

と表される。なお、 K は斥力の係数である。

次に、目標位置からの引力 \mathbf{F}_a ($|\mathbf{F}_a| = 1$) は、前方の力の作用点 \mathbf{r}_f に発生させる。現在位置の力の作用点 \mathbf{r}_f を通って、

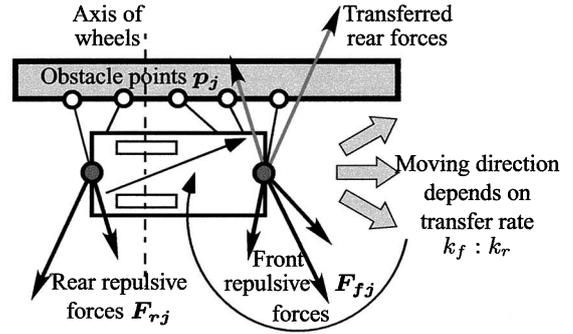


Fig. 7 Adjusting coefficient rate between front and rear forces in order to move straight along wall

目標位置における力の作用点 \mathbf{r}'_f の姿勢に接する円を描いたとき、現在位置の力の作用点 \mathbf{r}_f で円の接線方向を引力 \mathbf{F}_a とする (図6)。何も障害物がなければ、円軌道を進んで目標の位置姿勢 $\mathbf{R}_G = (X_G, Y_G, \Theta_G)^T$ に到達させるための1つの方法である。この円の接線方向 $\mathbf{F}_a = (\cos \psi, \sin \psi)^T$ は次式で求まる。ただし、 $R(\theta)$ は角度 θ の回転行列を表す。

$$\psi = 2 \operatorname{atan2}(y'_G, x'_G) - \theta_G \quad (6)$$

$$\theta_G = \Theta_G - \Theta \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x'_G \\ y'_G \end{bmatrix} = R(-\Theta) \begin{bmatrix} X_G - X \\ Y_G - Y \end{bmatrix} + R(\theta_G) \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_f \quad (8)$$

これらの斥力と引力の合力を求める。このとき、作用点の位置が異なるため、前方の斥力と後方の斥力を単純に足すわけにはいかない。後方の斥力は、逆向きにして、前方の力の作用点に移し、前方の力の作用点において全ての力の合力をとる。なぜなら、移動体は2つの車輪の中心回りに回転するため、車体が障害物点に当たらないように、後方の障害物点から車体後部を遠ざけるには、後方の斥力と逆向きに、前方の作用点を動かせばよいからである。すなわち、後方と前方の作用点は、車輪の中心を支点とする「てこ」のような関係になっている。 x 軸に関して線対称な力に変換する方法も考えられるが、後方の車体側面に近い障害物点からの斥力が移動体を後進させるように働くことによって、移動体が止まってしまう状況に陥ることが多くなる。以上のことから、前方の作用点における合力 \mathbf{F} は

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_a + k_f \sum_{p_{jx} > 0} \mathbf{F}_{fj} - k_r \sum_{p_{jx} < 0} \mathbf{F}_{rj}, \quad k_f + k_r = 1 \quad (9)$$

とする。ここで、 k_f, k_r は、前方と後方の斥力の作用割合を表す係数である。

この前後の斥力の作用割合を表す係数は、車体の形状やレーザ距離センサの検出範囲に影響されることから、理論的には求めにくい。前方の塊状の障害物を避けるような場合や両側の障害物の間を通過するような場合には、障害物に近づいた方の力の作用点に障害物からの斥力がかかり、障害物から離れる方に車体が回転していくため、前後の斥力のバランスはあまり敏感でない。比較的、前後の斥力のバランスの影響を受けやすいのは、図7のように、壁に沿って移動する場合である。壁からの斥力が移動体の前後に同時にかかり、前方の斥力の割合 k_f が大きすぎると、車体は右に回転し、壁から離れ過ぎるし、後方の斥力の割合 k_r が大きすぎると、車体は左に回転し、壁に接近し過ぎる。以上のことから、前後の斥力の

Table 1 Standard parameters for simulation

Range of laser range sensor	0 ~ 1 m
Directional resolution of laser range sensor	1 deg.
Sampling time for control: Δt	0.1 s
Coefficient of repulsive force: K	0.004
Coefficient of velocity: C	0.2
Maximum angular velocity: ω_{max}	0.2 rad/s

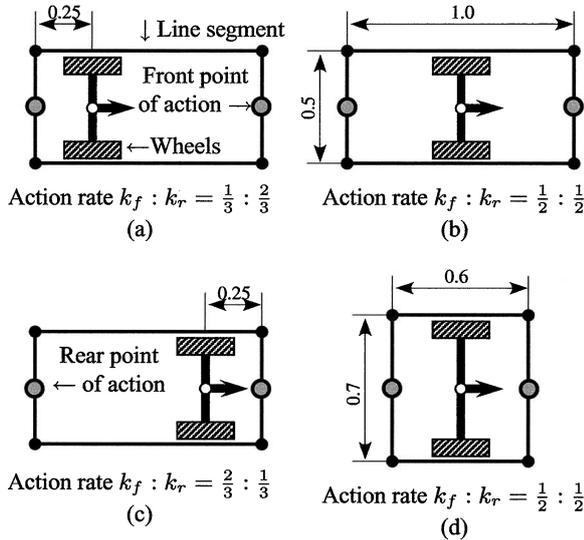


Fig. 8 Body shape of vehicles for simulation

作用割合 $k_f : k_r$ は、壁からある一定の距離に平行に、移動体の初期位置と目標位置を設定して移動させる、壁沿い走行のシミュレーションを繰り返し行って、壁に沿って直進するような値に調整する。

最後に、前方の作用点における合力の方向に、車体前方の力の作用点を引っ張って移動体を動かす。言い換えれば、前方の力の作用点 $r_f = (x_f, 0)^T$ が、合力の方向 $F/|F| = (f_x, f_y)^T$ に移動するように、移動体の速度 $(v, \omega)^T$ を決める。すなわち、

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

とする。ただし、 C は速度係数である。並進と回転の速度比が定まるだけなので、係数 C は適当に選べる。そこで、加減速したり最大速度等に制限をつけたりする場合には、それらの条件を満たすような係数 C を求めればよい。例えば、回転速度の最大値 ω_{max} を設けるには、次のようにすればよい。

$$C = \omega_{max} \frac{x_f}{f_y}, \text{ if } |\omega| > \omega_{max} \quad (11)$$

4. シミュレーション

提案したアルゴリズムを用いて、障害物回避のシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた標準的なパラメータを表 1 に示す。レーザ距離センサは車体の中央に設置した。レーザの走査は 1 度おきとしたので、障害物点の数は最大で 360 個となる。ある方向にレーザを出したとき、センサの計測範囲内で最短で障害物と交わる点を、計測される障害物点として求めた。レーザ距離センサの走査時間は、移動体の速度に対して十分速いとし、障害物点は瞬時に検出されるものとした。また、移動体の形状は、図 8 のように 4 種類を用意し

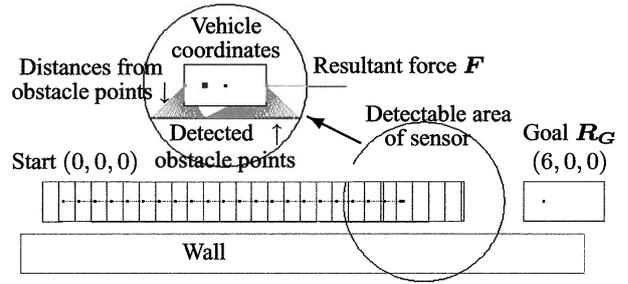


Fig. 9 Adjustment of force rate for a vehicle to move straight along a wall (Ex. Shape (a))

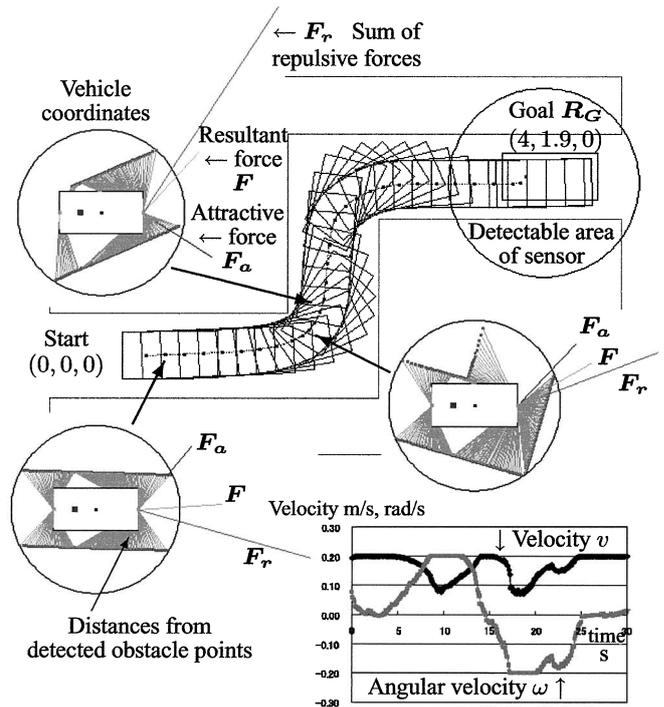


Fig. 10 Simulation result of the vehicle with shape (a)

た。長方形の車体については、駆動車輪が前方、中間、後方にある場合を考えた。それぞれの車体形状に対して、前方と後方の斥力の作用割合 $k_f : k_r$ を定めた。これは、図 9 のような壁沿い走行のシミュレーションを行って、移動体が壁に沿って直進するような割合を選んだ。

図 10 ~ 図 14 にシミュレーションの結果を示す。目標位置姿勢 R_G は、図中のような座標値を与えた。図 10 は、車体形状 (a) の移動体に対して、クランク状の通路を通過する軌道を生成した様子を示している。いくつかの地点で、その時点でレーザ距離センサで検出される障害物点と、斥力の生成に使われる障害物点から車体までの距離、及び、それらから求まる斥力の合力、目標からの引力、最終的な合力(回避方向)を移動体座標系で示した(図 10 中の各円内に示す)。また、移動体の速度、及び、角速度のグラフもあわせて示した。移動体の形状を、車輪間を中心とする円で近似した場合では通過できないような狭い場所でも、長方形の形状が考慮されて、車体を衝突させることなく移動できていることが分かる。移動体座標系上に示された情報を見ると、距離センサの情報から

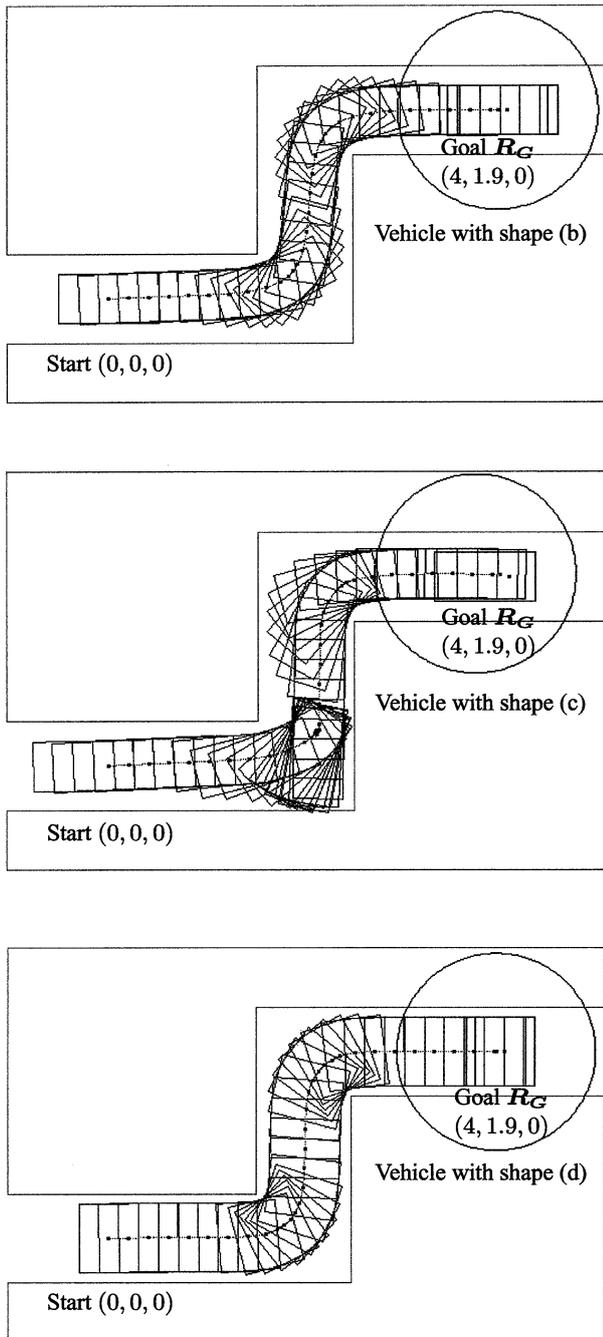


Fig. 11 Simulation results of the vehicles with various shape

直接的に簡単に、障害物を回避する移動方向が求まっている様子が分かる。移動体の速度についても、ほぼ滑らかに変化している。

図 11 には、他の車体形状について、クランク状の通路を通させた様子を示した。また、他の環境の例も図 12 に示す。どれも妥当な軌道が生成できていることが見てとれる。概ねいろいろな環境でシミュレーションした結果、提案する障害物回避法が有効であることが分かった。

図 13 は、ポテンシャル法の斥力の係数を変えたときのシミュレーション結果である。斥力の係数が大きいほど、障害物から離れた軌道になるが、斥力の係数の値や環境によっては、ポテンシャル法につきものの、ローカルミニマムに陥る

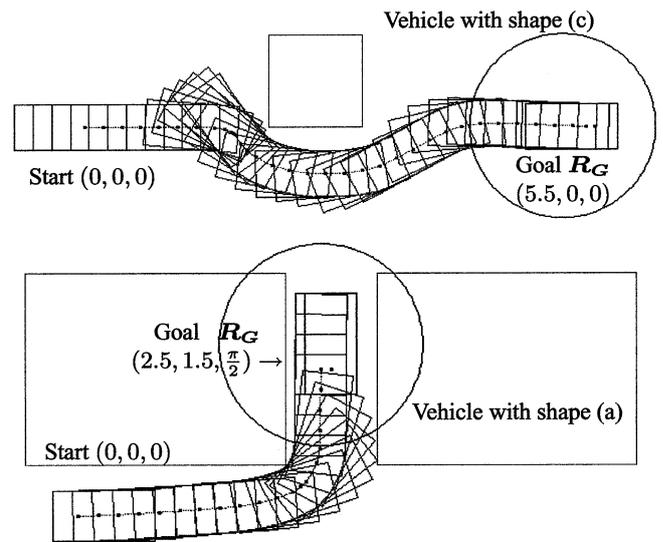


Fig. 12 Simulation results for various environment

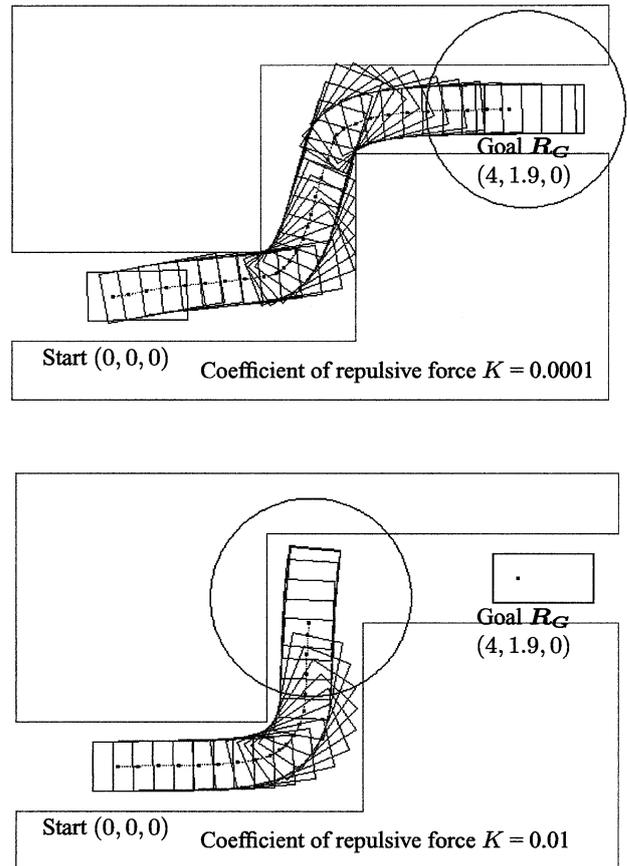


Fig. 13 Simulation results by using various coefficient of repulsive force

現象も見られた。移動体が時間が経ってもあまり移動しなくなったと判断した場合には、一時的に、斥力の係数を下げたり、反力を求めるのに使う障害物点の数を車体に近い順に何個かに減らしたりすると多少改善される(図 14)が、ローカルミニマムからの脱出処理については、通常のポテンシャル

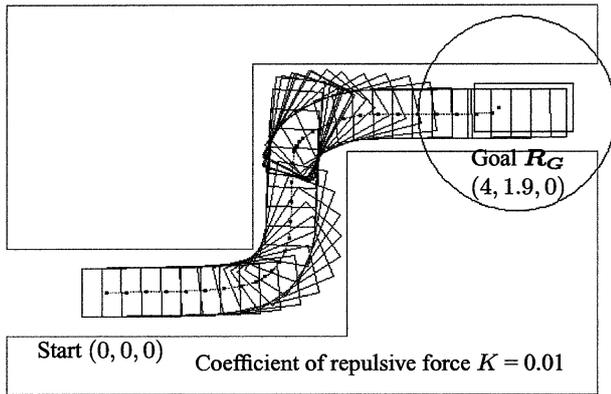


Fig. 14 Escape from local minimum by decreasing coefficient of repulsive force (When the vehicle stopped at Fig.13, coefficient of repulsive force K was temporarily decreased from 0.01 to 0.001 in 1 second.)

法に対して提案されている種々の方法が適用できると考えられるため、本論文ではこれ以上扱わない。

5. 結 論

レーザ距離センサを備えた非ホロノミックな独立2輪駆動の移動体を対象として、環境や障害物の局所的なセンサ情報から、車体形状を考慮して、障害物回避を行う実用的な方法を提案した。以下に結論をまとめる。

- (1) 移動体の車体の前後の外周上に力の作用点を設けて、障害物からの斥力を、車輪の中心を支点とする「てこ」のように作用させることで、移動体の運動拘束を考慮することができた。
- (2) 障害物からの斥力を、障害物点から車体までの距離の2乗に反比例させることで、車体形状を考慮した回避方向を求めることができた。
- (3) 長方形の車体について、特徴的な環境で障害物回避のシミュレーションを行い、適当な斥力係数等を選べば、少なくとも、クランク状の通路の走行、狭い通路への進入、前方の障害物を避ける走行などの場合において、車体が障害物に衝突せずに、局所的に障害物を回避して移動できることが示された。

- (4) なお、車体の前方と後方の斥力の作用の割合は、壁沿い走行のシミュレーションを繰り返し行って、壁に沿って直進するような状態になるように調整する必要がある。

この方法は、移動体の運動方向の拘束や車体形状を考慮するわりには、非常に簡単であり、距離センサの情報をそのまま用いてリアルタイムに計算できる。もちろん、ポテンシャル法が本質的に持っているローカルミニマムに陥る可能性は存在するし、車体が障害物に衝突しない完全な保証があるわけではないが、それにも増して、妥当な回避経路を簡易に求められる点は、実用性が高いと言える。また、独立2輪駆動の移動体だけでなく、自動車のようなタイプの移動体にも適用できると思われる。今後の課題としては、実際の自律電動車いす等への実装や長方形以外の一般的な車体形状への対応がある。

参 考 文 献

- 1) O. Khatib: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *Int. J. of Robotics Research*, **5**, 1, (1986) 90.
- 2) 小島 広久, 江口 幸弘: 楕円ポテンシャル場の局所最小点検出による2次元移動ロボットの動作計画法, *日本機械学会論文集 (C編)*, **68**, 670, (2002) 176.
- 3) I. Ulrich and J. Borenstein: VFH*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification, *Proc of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2000) 2505.
- 4) 登尾 啓史, 橋目 謙: 可視領域をもつ移動ロボットの未知空間における実地的なパスプランニングアルゴリズム, *日本ロボット学会誌*, **10**, 3, (1992) 74.
- 5) 鬼頭 朋見, 他: 最大曲率, 最大曲率変化率, 曲率連続性を考慮した移動ロボットの経路生成法, *日本機械学会論文集 (C編)*, **69**, 688, (2003) 129.
- 6) 山本 元司, 岩村 誠人, 毛利 彰: 動力学を考慮した二輪独立駆動型移動ロボットの近似最短時間軌道計画, *日本ロボット学会誌*, **16**, 8, (1998) 95.
- 7) M. Strobel: Navigation in Partially Unknown, Narrow, Cluttered Space, *Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1999) 28.
- 8) J. T. Schwartz and M. Sharir: On the Piano Movers' Problem: I. The Case of a Two-dimensional Rigid Polygonal Body Moving amidst Polygonal Barriers, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **36**, (1983) 345.
- 9) K. Kondak and G. Hommel: Computation of Time Optimal Movements for Autonomous Parking of Non-Holonomic Mobile Platforms, *Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2001) 2698.
- 10) J.P. Laumond, P.E. Jacobs, M. Taix, and R.M. Murray: A Motion Planners for Nonholonomic Robots, *IEEE Trans. on Robots and Automation*, **10**, 5, (1994) 577.
- 11) J.C. Latombe: *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, (1991).