

相対速度を考慮した人工ポテンシャル法による衝突回避アルゴリズム

A Collision Avoidance Algorithm using Artificial Potential Method considering Relative Velocity

石川 敏照*¹
Toshiaki Ishikawa

堀 浩一*²
Koichi Hori

*¹ 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
Department of Aerospace and Astronautics, School of Engineering, University of Tokyo

*² 東京大学先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

In this paper, we propose a new algorithm for collision avoidance based on Artificial Potential Method. In this algorithm, the shape of the Potential Field depends on the relative position and the relative velocity between two robots, by which we expect that we can apply the Artificial Potential Method to the environment where a lot of robots exist. The results of the simulations show that by the algorithm we proposed, robots can avoid collision each other, and that they can reach their goals with higher probability than the conventional Artificial Potential Method.

1. はじめに

本研究は工場内などの複数のロボットが共存する空間において、ロボットが互いに衝突を回避しながら、それぞれの目的地に辿り着くための衝突回避アルゴリズムを提案するものである。本研究で提案するアルゴリズムでは複数のロボットの動作計画を1つの管理者が管理する「集中管理型計画」[Schwartz 83]ではなく、各々のロボットが自律的に動作計画を行なう「分散管理型計画」[新井 93]を採用する。また、本研究では人工ポテンシャル法[Khatib 86]をベースとした衝突回避アルゴリズムの提案を行っている。

人工ポテンシャル法は1980年代にKhatibらによって提案された動作計画手法で、その計算構造の簡便さから即時性に優れた衝突回避手法として様々な研究が行なわれてきた[佐藤 93][Park 03][Kim 06]。

しかし、これらの研究の多くは主にロボットが1つしか存在せず、障害物の移動のない静的環境を想定した研究であった。そのため、これらの研究で提案された手法は実際の工場内など複数の移動ロボットが共存する空間での応用が難しかった。複数の移動ロボットの共存空間での応用における問題としては静的環境でも問題となっている「滞留」の問題の他に「妨害状況」がある[新井 93]。「妨害状況」とはロボットが相互の干渉力の効果により、お互いが停止することなく、目的地から遠ざかって行ってしまいう状況である。妨害状況の一例を図1に示す。

このように人工ポテンシャル法を複数の移動ロボットが共存する空間に応用するにはこの「妨害状況」をいかに防ぐかが問題となる。

人工ポテンシャル法による衝突回避手法の一つにHuangらによって提案された角度ベース人工ポテンシャル法[Huang 06]がある。Huangらの手法では依然、「妨害状況」の問題は解決されていないものの、これまで目的地や障害物との相対距離のみを考慮していた人工ポテンシャル法に相対角度の考慮も加えるこ

とによって、より人間の動きに近い衝突回避を実現した。

そこで本稿ではこのHuangらの手法に着目し、この手法を基に複数ロボット共存空間で妨害状況が発生させるとなく衝突回避を行なう手法について検討する。

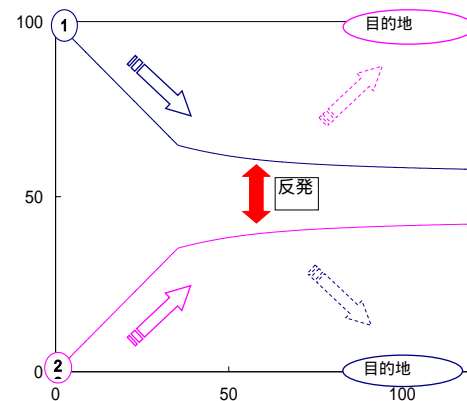


図1: 妨害状況

2. 角度ベース人工ポテンシャル法

本章ではHuangらによって提案された角度ベースの人工ポテンシャル法[Huang 06]について概説する。

この手法は次の角運動方程式によって運動の制御が行なわれている。

$$\dot{\phi} = -b\dot{\phi} - k_g(\phi - \psi_g)(e^{-c_1 d_g} + c_2) + \sum_i k_{o_i}(\phi - \psi_{o_i})(e^{-c_3 |\phi - \psi_{o_i}|})(e^{-c_4 d_{o_i}}) \quad (1)$$

ここで $b, k_g, k_{o_i}, c_1, c_2, c_3, c_4$ は定数であり、 ϕ はロボットの速度方向、 ψ_g, d_g はそれぞれロボットから見た目的地の方向と距離、 ψ_{o_i}, d_{o_i} はそれぞれロボットから見た障害物の方向と距離を示す。

(1)式は3つの項から成り立っている。

第一項は減衰項であり、減衰定数 b によってロボットの挙動の安定化を図っている。

連絡先: 石川敏照, 東京大学大学院工学系研究科, 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学先端科学技術研究センター 知能工学研究室, t-ishikawa@ai.rcast.u-tokyo.ac.jp

第二項はロボットの速度方向を目的地方向へと向けるトルクを表す。このトルクは目的地との距離 d_g が0に近づくにつれ、大きくなり、ある一定の値に近づく。

第三項はロボットの速度方向をそれぞれの障害物 ($m=1,2,\dots,i$) 方向から遠ざけようとするトルクの和を表す。これらのトルクは障害物との距離 d_{oi} が0に近づくにつれ、大きくなり、ある一定の値に近づく。

第二項と第三項の和はポテンシャル力として表すことができ、(1)式は(2)(3)式のように表すことができる。

$$\dot{\phi} = \frac{d\Phi}{d\phi} - b\dot{\phi} \quad (2)$$

$$\Phi = \Phi_g + \sum_i \Phi_{oi} \quad (3)$$

(3)式の第一項はゴールポテンシャルを表しており、目的地方向をロボットが向いている時に最小値をとる。また、(3)式の第二項は障害物ポテンシャルを表しており、ロボットの向きが障害物の方向に近づくほど、また、ロボットと障害物の距離が小さくなるほど大きくなる。

この外、Huangらの手法では、速度方向の制御と同時に以下の式によって速度の制御も行なっている。

$$v = \max\{v_{MAX}e^{-k_v\Phi_o} - \varepsilon, 0\} \quad (4)$$

ここで k_v は定数であり、 ε は充分小さい定数を表す。

これは障害物ポテンシャルが大きくなるほど、速度が小さくなる事表している。このため、Huangらの手法では障害物との衝突の危険性が高い領域では速度を落として衝突回避を行なっている。

3. 提案する手法

本研究では、複数移動ロボットが共存する環境への角度ベース人工ポテンシャル法の応用を行なう。

その際、各々のロボットが左右同じ条件で回避行動をしていては「妨害状況」が防ぐことが出来ないと考えられるため、相手ロボットの右側にいる場合と左側にいる場合とで異なる人工ポテンシャル場を用いた。そうすることでロボットは相手ロボットの右側にいる場合、左側にいる場合に比べてより積極的に回避行動を行なう。

また本研究では問題設定として、相手ロボットの情報は位置 (x,y) 、および速度 v 、および速度方向 ϕ のみがわかっているものとする。

具体的な手法について以下に示す。

3.1 干渉半径を考慮

2で述べたHuangらの手法では障害物の大きさは無視されていた。そのため本研究ではまず、(1)式の第三項を干渉半径を考慮した形に変形した。これは干渉距離を R_m とし、障害物との距離を d_{oi} し、 $\theta_m = \text{Arcsin}(R_m/d_{oi})$ とすると、(1)式第三項内の要素は次のように表すことができる。

$$k_{oi}(\phi - \psi_{oi})(e^{-c_3\{|\phi - \psi_{oi}| - \theta_m\}})(e^{-c_4(d_{oi} - r_m)}) \quad \left\{ \begin{array}{l} |\phi - \psi_{oi}| > \theta_m \\ |\phi - \psi_{oi}| \leq \theta_m \end{array} \right\} \quad (5)$$

3.2 左右の判断

本研究では妨害状況を生じさせないために相手ロボットの右側にいる場合と左側にいる場合とで異なる人工ポテンシャル場を用いる。その際、

自身が相手ロボットの速度方向右側に位置する。
自身の目的地方向を ϕ_g 、相手ロボットの速度方向 ϕ_{ov} とすると、 $\phi_g - \phi_{ov}$ が $\sin(\phi_g - \phi_{ov}) > 0$ を満たす。

の二つの条件を満たす時、自身は相手ロボットの「右側に存在する」と見なし、(5)式の障害物ポテンシャルとは異なる障害物ポテンシャルを適用する。

3.3 障害物ポテンシャル

障害物ポテンシャルによる力を相手ロボットとの位置関係により以下のように定める。

相手の「右側にしない」とき

(5)式を用いる。

相手の「右側にする」とき

以下の手順で障害物ポテンシャルによる力を求める

1. 図2のように相手ロボットの位置を仮想的に

$$l_v = \frac{1 + \cos\theta_c}{2} l_c \quad \{l_c: \text{定数}\} \quad (6)$$

だけ前進させる。

2. 図2のように a, b, d を定義し、現在の自分の速度方向に応じて以下の式で障害物ポテンシャルによる力を求める。

$$k_{oi}(\phi - \psi_{ov})(e^{-c_3\{|\phi - \psi_{ov}| - \theta_b\}})(e^{-c_4(d_{oi} - r_m)}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi \leq \theta_a \\ \theta_a < \phi < \theta_a + \theta_b + \theta_d \\ \theta_a + \theta_b + \theta_d \leq \phi \end{array} \right\} \quad (7)$$

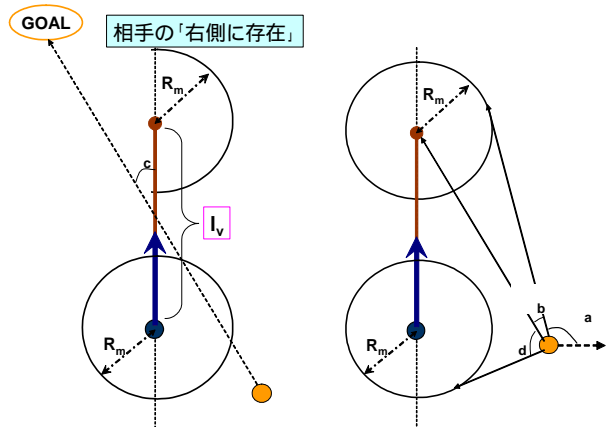


図2: l_v だけ仮想的に前進させられた相手ロボットの干渉半径 各干渉円に対する接線方向、および仮想中心方向

3.4 相対位置による速度制御

速度の大きさは以下のように定める。

・相手の「右側にしない」とき

(4)式を用いる。

・相手の「右側にする」とき

交点 A(図 3)が相手ロボットの前方に有るとき
 v_1 および v_2 を図 3 のように定義すると、

$$v = \max \{v_{MAX} e^{-k_v \Phi_v} - \epsilon, 0\} e^{-c_s (\theta/\theta_2)} \quad (8)$$

交点 A(図 3)が相手ロボットの後方に有るとき
 (4)式を用いる。

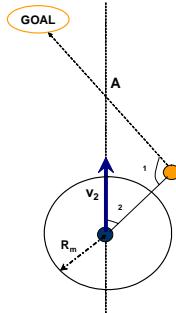


図 3: 相対位置による速度制御

4. シミュレーション

3 で提案した手法の有効性を検証するため、以下の衝突回避シミュレーションを行なった。

4.1 二体衝突回避

提案した手法を用いていくつかの交差点における二体衝突回避シミュレーションを行なった。(図 4)

いずれの角度においても右側のロボットが左側のロボットを優先させることによって妨害状況を起こさずに衝突を回避することが出来た。

また相対位置による速度制御を用いることによって、右側のロボットの経路の変化を少なくすることができた。(図 4 太線部)

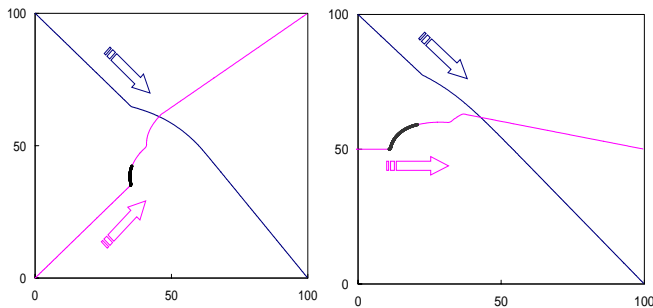


図 4: 二体衝突回避 交差点角:90° 交差点角:45° (太線部分は相対位置による速度制御が行なわれている部分)

4.2 多体衝突回避

提案した手法について複数のロボットでの衝突回避シミュレーションを行なった。(図 5)

二体衝突回避のときと同様、右側のロボットが左側ロボットの後ろに回ろうとすることによって妨害状況を引き起こさずに衝突が回避された。

4.3 静止障害物が多数存在する中での多体衝突回避

提案した手法と従来の角度ベース人工ポテンシャル法について、静止障害物が多数存在する状況でのシミュレーションを行なった。(図 6)

図 6 は(100,100)を中心とする半径 100 の円周上に等間隔に 8 個のロボットを配置し、それぞれ円周上の正反対の地点を目的

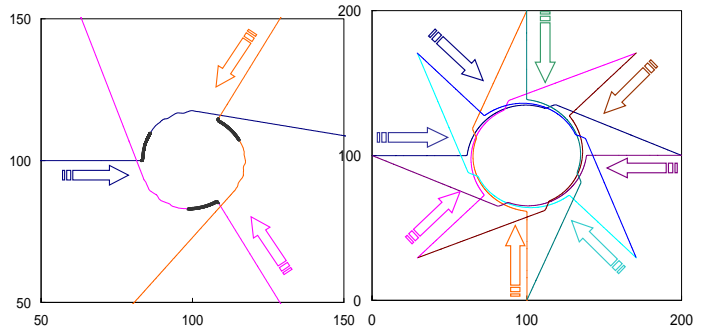


図 5: 多体衝突回避 三体衝突回避(太線部分は相対位置による速度制御が行なわれている部分) 八体衝突回避

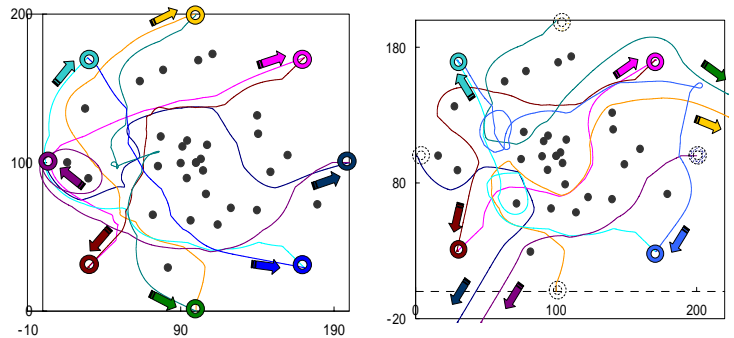


図 6: 静止障害物 30 個、ロボット 8 個での衝突回避 提案した手法 従来の角度ベースポテンシャル法(黒丸は静的障害物を表す)

地としてシミュレーションを行なった。ここでは円周内に 30 個の静止障害物をランダムに配置した。

従来の角度ベースポテンシャル法(図 6)では 8 個中 4 個のロボットが妨害状況を起こして目的地に辿り着くことが出来なかったのに対して提案した手法(図 6)では全てのロボットが妨害状況を引き起こすことなく、目的地に辿り着く事ができた。

4.4 従来の角度ベース人工ポテンシャル法との目的地到達率の比較

提案した手法によって、目的地到達率がどのように変化したかを検証するために以下の手順でシミュレーションを行なった。

手順(図 7)

- 1.(100,100)を中心とした半径 100 の円周上に等間隔に 5 個の出発点とそれぞれの出発点に対して円周上の反対側に 5 個の目的地を配置する。
- 2.(100,100)を中心とする半径 85 の円内に 30 個の静止障害物をランダムに配置する。
- 3.提案したアルゴリズムを用いて 5 個のロボットをそれぞれ出発点から目的地へ向かわせて充分時間が経過した後に目的地にたどりついたロボットの数を数える。
- 4.3 と同様に従来の角度ベースポテンシャル法を用いて 5 個のロボットをそれぞれ出発点から目的地へ向かわせて充分時間が経過した後に目的地にたどりついたロボットの数を数える。
5. 障害物の配置をランダムに変えて 1~4 の手順を 1000 試行行ない、それぞれの手法についての目的地到達率を求める。
6. ロボットの数 を 5,10,15,20 と変化させて、1~5 の手順を繰り返して、ロボットの数 がそれぞれの場合の到達率を求める。

また設定条件は最大速度 $V_{max}=1(1/s)$,更新間隔 0.1(s),干渉半径 $R_m=10$ としてシミュレーションを行なった.

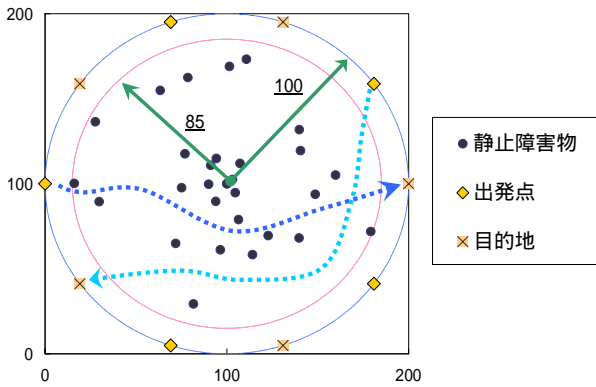


図 7:障害物 30個,ロボット 5個での衝突回避シミュレーション

シミュレーション結果を図 8 に示す.

図 8 より,提案した手法では従来の手法に比べて目的地の到達率が大幅に改善されたことがわかった.

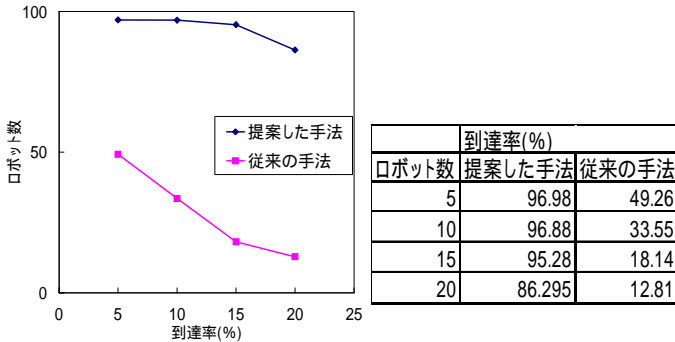


図 8:提案した手法と従来の手法での目的地到達率の比較

5. まとめ

本稿では,角度ベース人工ポテンシャル法を複数移動ロボットが共存する環境に応用するため,相手ロボットの右側にいる場合と左側にいる場合とで異なる人工ポテンシャル場を用いる手法を提案した.これにより,従来の人工ポテンシャル法で問題であった「妨害状況」を回避することができるようになった.またシミュレーションによって,提案した手法は多数のロボットや静止障害物が存在する環境においての目的地到達率を従来の手法に比べて大幅に高めることがわかった.

今後は,多数の障害物が存在する環境においての目的地到達率をさらに高める事や各式に多数含まれる係数の決定手法について検討を進める予定である.

参考文献

- [Schwartz 83] J.T.Schwartz and M.Sharir, :*On the Piano Movers' Problem:* , Int.J.Robotics Research , Vol.2-3,pp.46-75(1983)
- [新井 93] 新井 民夫,太田 順: 仮想インピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.7,pp.1039-1046 (1993)
- [Khatib 86] O.Khatib, : *Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots* , Int.J.Robotics Research , Vol.5-1,pp.90-98(1986)
- [佐藤 93] 佐藤 圭祐: 極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画, 日本ロボット学会誌, vol11 No.5,pp.702-709(1993)

[Park 03] M.G. Park, M.C. Lee: *Artificial Potential Field Based Path Planning for Mobile Robots Using a Virtual Obstacle Concept* , Proc of the IEEE int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.735-740(2003)

[Kim 06] D.H. Kim, S. Shin: *Local path planning using a new artificial potential function composition and its analytical design guidelines* , Advanced Robotics **20**, pp.115-135(2006)

[Huang 06]H.Huang,R.Fajen,R.Fink,H.Warren:*Visual navigation and obstacle avoidance using a steering potential function* , Robotics and Autonomous Systems 54 pp.288-299(2006)