人間と共存協調するロボットのための回避行動の生成*
(第2報, 移動ロボットの移動障害物回避)田所 諭^{*1}, 林 真樹^{*2}, 真部 靖弘^{*2}
中見 至宏^{*2}, 高森 年^{*1}Generation of Avoidance Motion for Robots which Coexist and Cooperate
with Humans
(2nd Report, Avoidance of Moving Obstacles for Mobile Robots)Satoshi TADOKORO, Masaki HAYASHI, Yasuhiro MANABE,
Yoshihiro NAKAMI and Toshi TAKAMORI

This paper presents a trajectory planning method by which human cooperative mobile robots can avoid collision with human bodies. Indefinite human motion is predicted using a stochastic predictor. Evaluation of collision risk and efficiency of trajectory are taken in account in an evaluating function. Optimization using a genetic algorithm gives the robot trajectory. The mobile robots move so as to maximize safety taking into account every possible human motion. Simulation results showed that the robot could determine appropriate trajectories avoiding danger and that reasonable trajectories were generated even if human motion unexpectedly changed.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Mobile Robot, Man-Machine, Human Interface, Dynamic Obstacle, Safety, Coexistence, Cooperation

1 はじめに

サービスロボットやホームロボットのように人間と共存協調するロボットにはさまざまな動作が要求される。Table 1 に示すように、産業用ロボットのように指定された関節角や位置決め精度を実現する機能 (Physical Level) をもつだけでなく、それを巧みに組み合わせた衝突回避や人間との協調作業などの機能 (Motion Level) が必要である。また、それらを組み合わせて目的を達成する機能 (Task Level) が必要である。ロボットは人間の動作や要求に応じて自律的に行動できなければならない。さらに、人間が無意識下に心の中に持っている要求にも応えなければならない。さらには、人間の心理に影響を与えるような動作、たとえば、ほほえんだり踊って見せたりする機能や心に訴え掛けるような機能 (Mind Level) も必要であろう。しかし、現存する人間と共存協調するロボットを見てみると、Motion Level や Physical Level の機能ですら充分満足に実現できて

いないのが現状である。

移動ロボットの障害物回避に関しては多くの研究がある。一般的な移動障害物に対して、固定障害物回避法であるポテンシャル法 [1, 2]、グラフ探索法 [3]、階層化空間記述 [4] などを拡張した研究がある。これらの方法は障害物の運動の不確実性が小さい場合には有効である。ところが、人間の動作は単純ではなく、未知要素、不確実性が大きい。そのため、これらの方法を人間の回避に適用することは難しい。

不確実性が大きい運動障害物に対して、評価関数による方法 [5]、ファジールールによる方法 [6, 7]、サブサンプシオンアーキテクチャ [8] による方法などがある。これらの研究では障害物の運動が未知であることを前提とし、巧みに衝突を回避するためのヒューリスティクスを組み立てていた。しかしながら、実際にはあらゆる可能性のある運動に対して見落としなく対応策を指定することは困難である。さらには、障害物が複数個存在する環境下では、その組合せのすべての場合を考慮することは不可能であろう。見落としがあった場合、それが重大な事故につながる可能性がないとはいえない。

* 原稿受付 1996年6月6日。

^{*1} 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。^{*2} 神戸大学大学院。

Table 1 Expected Motion of Service Robots in Amusement Parks

LEVEL	MOTION
Physical level	Joint angle, Wheel rotation
	Position, Orientation, Velocity
	Force, Impedance
Motion level	Positioning, Moving to targets
	Collision avoidance
	Tactical peg-in-hole
Task level	Cooperative transfer
	Guidance, Helping on request
	Garbage collection
Mind level	Dance, Smile, Funny pose
	Playing with children
	Psychological communication

本来は、避けるべき障害物の運動の性質を元にして、避ける方法についての議論がなされるのが望ましいと考える。上記のヒューリスティックな方法においても、暗に障害物が限られたクラスの運動を行うということを仮定し、それに対応できるような対策を個別に工夫していたと考えられる。そこでは、障害物の運動を予測し、危険性を見積もり、それを巧みに避けるという3者を同時に実現できるようなヒューリスティクスを作っていたと考えられる。我々は、その原点に立ち返り、これら3者を積極的に分割して独立した部分問題として考えることによって、より適切な解を求めることができると考える。

著者らはロボットの回避行動生成のための人間の行動予測モデルを提案し、これをマニピュレータの動作計画に適用することによってその有効性を示した [9, 10]。そのモデルでは、確率過程の考え方にに基づき、可能性のあるあらゆる人間の運動が同時に考慮され、いつ、どの程度の危険が、どのくらいの確率で生じるかをあらかじめ知ることができることが示された。

本論文は、この方法によって確率的に予測される人間の動きをもとにして、移動ロボットの回避計画を行うことを主眼とする。可能性のある人間のあらゆる動作が予測に含められるため、より適切な運動を計画できると考える。

ここでは回避過程を動作予測、危険度の評価、経路の決定の3ステップに分割する。動作予測のステップでは統計的な性質として人間の行動が予測され、それに基づいて危険性が評価できる。したがって、回避法としては固定障害物の方法を拡張した方法を利用する。従

Fig. 1 Overview of the Motion Planner

来の方法では「如何に避けるか」が最も重要なヒューリスティクスであったが、ここで提案する方法では「如何に動作を正しく予測するか」と「如何に将来における危険性を正しく見積もるか」がより重要である。

2 提案する軌道計画法の概要

Fig. 1に本論文で提案する軌道計画器の概要を示す。複数の人間の運動はセンサシステム [11] により計測される。確率過程モデルを用いた行動予測器 [9, 10] により将来の複数の人間の動きが予測される。その結果、時変の人間の存在確率マップが得られ、将来の各時刻における危険度が予測される。危険度と軌道の効率からなる評価関数を遺伝アルゴリズムにより最適化し、ロボットの軌道を決定する。以上がサンプリングタイム毎に繰り返される。これにより人間の動作のさまざまな可能性を考慮して最も安全性と効率が高いようにロボットは動作を行う。

3 人間の動作の確率的予測

人間の2次元平面内での状態が、存在している中心座標と移動速度により表現されるものとする。この状態がマルコフ過程として時間にしたがって状態遷移するという確率的モデルを考える。このモデルによれば、近い将来について時変の人間の存在確率のマップが予測できる。

状態遷移の確率はあらかじめわかっているものとする。その値はさまざまな要因によって決定されていると考えられるが、それらは実際には計測や推定がとて不可能である。ここでは、われわれが実際に運動の予測に利用できる情報は人間の位置と運動の情報だけであると仮定し、それだけで確率の値を決定できると考える。具体的には、各場所が状態遷移の確率を決定すると仮定することにする。つまり、各場所がその空間の中で隠された固有の役割を持っており、状態遷移の確率は場所の性質によって決まるとする。モデルが確率的であり、予測結果が一意に得られるわけではないので、他の要因による行動の変化の可能性は確率的なばらつきの中に包含されていると考える。

各場所における状態遷移の確率は、次の性質を考慮することによって試行錯誤的に決定した。1) 進行方向に進む確率が高い、2) 通路では道なりに速さ不変で進む確率が高い、3) 壁に近づくにつれて壁と反対方向に進む確率が高くなる、4) 交差点の近くでは進行方向が変わりやすく、進む方向には偏りがある、5) 壁や交差点では速さが遅くなることが多い、6) 場所によっては特有の動作の傾向がある。たとえば、本棚の前では立ち止まることが多いなど。

室内を想定したさまざまなシミュレーションを行った結果、短時間の予測においては、経験的にわかっている人間の動きと合致するような予測結果を得ることができる、ということが明らかになった [9, 10]。

4 軌道の評価

4.1 危険度 ここでは人間の存在の確率的分布が時間の経過に従ってどのように変化していくかを知ることができる。したがって、直接的に衝突の可能性の大きさを計算することが可能である。

ここでは、前報 [10] で述べた理由により、ロボットが人間に及ぼす可能性のあるエネルギーの期待値が高ければ高いほど危険である、という考え方に基づいて危険度を定義することにする。

本来は、危険度は人間が被る肉体的・精神的傷害の程度を定量化することによって評価されるべきであろう。ロボットの運動と傷害の大きさに関する研究も進めら

れているが、まだ評価に用いることができるまでには至っていない [14, 15]。また、心理的恐怖感の大きさも本来は考慮されるべきであるが、今後、運動と心理的要因との関連が明らかになることによって可能になっていくと考えられる。

具体的には、計画されたロボットの軌道と予測された人間の将来における存在の確率分布を用いて、次のように危険度 D を定義する。

$$D = \sum_{t=0}^{T'} D_{pt} D_{et} \quad (1)$$

ただし、

$$D_{pt} = P_t \quad (\text{確率の要素}) \quad (2)$$

$$D_{et} = \frac{1}{2} m |\mathbf{v}_t|^2 \quad (\text{運動エネルギー要素}) \quad (3)$$

$$T' = \min(T, T_{pred}) \quad (4)$$

ここで、 P_t は時刻 t における接触の確率、 $\mathbf{v}_t$ は時刻 t における自律移動ロボットの速度、 m は自律移動ロボットの質量、 T はタスクの完了に要する時間、 T_{pred} は予測を行う時間である。

4.2 評価関数 自律移動ロボットは危険にならない範囲内で効率の良い移動経路を選択しなければならない。そのため、次の要素を考慮することにする。

1. 危険度が小さいほどよい。
2. 経路の長さが短いほどよい。
3. 経路の直線性が高いほどよい。
4. 運動エネルギーの変化が少ないほどよい。

経路の長さは、通過するセル間の距離の総和

$$d = \sum_{t=0}^{T-1} |\mathbf{p}_{t+1} - \mathbf{p}_t| \quad (5)$$

で評価した。ただし、 $\mathbf{p}_t$ は時刻 t における自律移動ロボットの位置ベクトルである。

経路の直線性は曲がるときの方向余弦の総和として次の関数により評価した。

$$a = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{\mathbf{v}_t \cdot \mathbf{v}_{t+1}}{|\mathbf{v}_t| |\mathbf{v}_{t+1}|} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$ はベクトルの内積を表す。

運動エネルギーの変化は、各時刻での変化の絶対値の総和として、

$$e = \frac{1}{2} m \sum_{t=0}^T ||\mathbf{v}_{t+1}|^2 - |\mathbf{v}_t|^2| \quad (7)$$

により評価した。

以上の要素を用いて、軌道決定のための評価関数を

$$E = \alpha D + \beta d + \gamma a + \delta e \quad (8)$$

と定義した。ただし、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ はそれぞれの要素の重みである。

この評価関数を最適にする経路をロボットの軌道とする。

5 軌道の最適化

5.1 最適化手法と問題のモデル化 評価関数を最適にする軌道を求める方法は、数理計画法やニューラルネットなど、これまで数多く提案されてきているが、ここでは遺伝的アルゴリズム (GA) [12, 13] を用いることにする。

次の理由により GA の採用を決定した。

1. ここでは各遺伝子を経由点に対応づけるようなコーディングを行っている。このとき、部分遺伝子列は部分経路に対応づけられる。仮に部分的に最適な経路が求められていたとすると、それは障害物とのトポロジーが同じである経路のクラス内では依然として最適であることが多い。遺伝的アルゴリズムは適応度の高い部分遺伝子列を保存しようとするので、部分的な最適経路が保存され、この問題に対して有効である。
2. トポロジーが異なる複数の経路を最適経路の候補として考慮することができるため、局所的ではなくグローバルな最適経路が求められる可能性が高い。
3. この問題は動作の確率などが評価関数に関係する複雑な問題であり、性質のよい求めやすい問題であるとは考えにくい。このような問題に対して GA は有効であると言われている。
4. 平面を量子化するセルの大きさを 30cm×30cm 程度とすると、遺伝子の長さはそれほど長いものにはならず、計算量はそれほど多くない。

問題は次のようにモデル化した。

1. 場所を遺伝子に対応づけ
自律移動ロボットの経路は各時刻における座標の連鎖として表現できる。ここでは 1 つの座標を 1 つの遺伝子に対応付け、1 つの遺伝子配列が 1 つの経路を表すようにモデル化した。
2. 遺伝子の個数で時間を表現
時間は遺伝子の個数によって表現される。したがって、長い時間を要する経路は長い遺伝子配列を要する。また、自律移動ロボットの停止は同じ座標が連続することによって表現される。

この他にも、自律移動ロボットの速度を遺伝子に対応させるモデル化や時間情報を遺伝子配列で表現する方法、バイナリコーディングする方法などを検討した。しかし、交叉の容易性、遺伝子の長さ、表現の簡潔性などを考慮した結果、上記のモデルを採用することにした。

言うまでもなく、ここでは GA を使わなければならない必然性はない。また、他の最適化手法がより優れている可能性も高い。しかしながら、本論文の主旨は最適化手法の長短を論ずることではなく、確率的行動予測が

Fig. 2 Resultant Motion for Mission 1

移動ロボットの回避運動の生成にどの程度有効かを検討することにある。そのため、これ以上の詳細な検討は行わないことにした。

5.2 アルゴリズム 次の手順で経路を求める。

1. 初期経路の生成
出発点から目的地に向かう固定障害物を回避した経路 (複数) をランダムに生成する。
2. 経路の評価 (適合度評価)
3. 良い経路の選択 (淘汰)
4. 結合分離による新経路の生成 (交叉)
同じ地点を通る経路をランダムに 2 個選び、その地点以後の部分経路を交換することによって新たな経路を生成する。
5. 小変更による新経路の生成 (突然変異)
ランダムに経路中のセルを取り除く、あるいは経路中のセルを隣接する 8 近傍のセルに入れ換えるという処理により、新たな経路を生成する。
6. ステップ 2 から 5 を繰り返す。

6 シミュレーション結果

6.1 自律移動ロボットの経路を人間が横切の場合
室内で自律移動ロボットの経路を人間が横切の場合についてシミュレーションを行った。経路計画の結果を Fig. 2 に示す。円はロボットの動きを、正方形は人間の動きを、数字は時刻を表す。

はじめは左からやってくる人間を右に避ける行動を行っている。しかし、 $t=2$ には人間が早く通り過ぎる可能性が高いことが判断され、移動方向を変更し、人間を右にやり過ぎしている。その後は最短経路をたどっ

(a) $t = 1$ (b) $t = 2$ (c) $t = 3$

Fig. 3 Generated Motion at each time for Mission 1

て目的地に到達している。

時間に従って経路選択の過程を追うと、次のようになる。

$t = 1$ (Fig. 3 (a))

人間が右にゆっくりと移動しているため、数時間ステップ後に交差点にさしかかる確率が高くなっている。このままでは $t = 5, 6$ あたりで危険度がかなり大きくなってしまいます。そのため、それを右に避けるような軌道が生成された。

$t = 2$ (Fig. 3 (b))

① Robot Motion ■ Human Motion

Fig. 4 Resultant Motion for Mission 2

人間は右方向に大きく加速し、もう交差点にさしかかろうとしている。そのため、 $t = 1$ での予測よりもかなりはやい時刻に人間が右に移動してくる可能性が高い、という予測結果が得られた。このまま $t = 1$ で生成された軌道が続けて右に人間を回避すると非常に危険になってしまう。そこで、人間が通り過ぎるのを待って左から避けるという軌道に急遽変更された。さらに、交差点では移動方向が変化する可能性が高いため、時刻 $t = 4$ でいったん立ち止まり、方向が変化した場合の危険性も避けている。

$t = 3$ (Fig. 3 (c))

人間は交差点内に入り、右方向に通過していく確率がさらに高くなっている。そのため、左に積極的に動いて危険を避けるような行動が選択されている。

$t = 4$

人間はほとんど通り過ぎてしまったため、人間による危険度の影響は小さくなり、評価関数にしろる軌道の効率の割合が大きくなっている。そのため、この地点から長さが短く、直線的でエネルギー変化が少ない軌道に変更されている。

$t > 4$

危険度の影響がなくなったため、これ以降の最適軌道は変更されることがなく、ロボットは最終目的地まで達した。

6.2 人間が後方から自律移動ロボットに近づく場合
Fig. 4に人間が高速に後方から自律移動ロボットに近づき追い越していこうとする場合のシミュレーション結果を示す。

はじめ自律移動ロボットは人間に追いかけるように同じ方向に逃げる動作を行っている (Fig. 5 (a))。しかし、人間の速度が速いためどうしても衝突すると

(a) $t = 1$ (b) $t = 3$ (c) $t = 5$

Fig. 5 Generated Motion at each time for Mission 2 (1/2)

(d) $t = 6$

Fig. 5 Generated Motion at each time for Mission 2 (2/2)

判断され、 $t = 2, 3$ あたりでは横に避ける動作を行っている (Fig. 5 (b))。ところが、 $t = 3$ で人間の動作が減速されたため衝突の危険が少なくなり、 $t = 5$ では経路の効率を重視して通路を横切るような経路が生成されている (Fig. 5 (c))。ところが、 $t = 6$ では通路を通ってくる確率が高いことがわかったため、いったん人間の進行方向に逃げてからゴールに向かう経路が生成された (Fig. 5 (d))。

このほかにもさまざまな移動障害物の運動や自律移動ロボットのタスクを与えてシミュレーションを行い、同様な結果を得た。

6.3 シミュレーションに対する考察 以上のように、自律移動ロボットは危険度を動的に判断しながら各時点において適切な判断を行い、危険を回避しながら目的地に到達していることがわかった。

特に、一度選択された経路が人間の運動の変化により不適切になるような場合においては本手法は有効であると考えられる。さらに、本手法は複数の人間が存在する場合にも容易に適用可能である。他の方法、たとえばルールにより避ける方向を選択する方法では非常にバリエーションが多い運動の変化や人間の数のすべての組合せを見落とすことなくルールに盛り込むことは容易ではない。また、反射的に各行動要素が分散的に判断して回避軌道を生成するような方法では各反射行動要素がうまく協調して有効な行動をとるということを確実に保証することはできない。

本手法では、回避行動の決定にはヒューリスティックな方法は使われず、評価関数を最適にするように運動が決定される。したがって、他の方法が回避行動の決定法に心血を注ぐ必要があるのに対して、本方法では評価関数の設定、特に移動障害物の行動予測が非常に重要である。適切に危険度と軌道の効率の評価が行われ

ば、あとは合理的な方法により軌道が決定される。
実験による有効性の検証は今後の課題である。

7 おわりに

本論文では、人間共存協調形移動ロボットに必要な人間との衝突を回避する軌道計画法を提案した。その主要な点は次の通りである。

1. 確率過程モデルを用いた行動予測器により近い未来の複数の人間の動きが予測され、各時刻における障害物の存在確率マップが得られる。
2. どの時刻にどの程度衝突の危険が生じるかが危険度として見積もられる。
3. 危険度、径路長、直線性、エネルギー変化を用いて計画軌道の評価関数を構成する。
4. 評価関数を最適化することによってロボットの軌道を決定する。
5. シミュレーションの結果、障害物の運動の変化により適切な軌道が動的に変化するような場合にこの方法は特に有効であることが明らかになった。

文 献

- [1] O. Khatib, Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Intl. J. Robotics Research, Vol. 7, No. 1, pp. 90-98 (1986)
- [2] C. Connolly, J. Burns and R. Weiss, Path Planning Using Laplace's Equation, Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, pp. 2102-2106 (1990)
- [3] T. Lozano-Perez and M. A. Wesley, An Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles, Communications of the ACM, Vol. 22, No. 10, pp. 560-570 (1979)
- [4] S. Kambhampati and L. S. Davis, Multiresolution Path Planning for Mobile Robots, IEEE J. Robotics and Automation, Vol. 2, No. 3, pp. 135-145 (1986)
- [5] 武野、柿倉、移動ロボットの移動障害物に対する衝突回避問題について、日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 499-503 (1986)
- [6] 前田、竹垣、ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御、日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 6, pp. 518-522 (1986)
- [7] 石川、浅香、移動障害物を含むような動的変化を伴う走行環境における自律移動ロボットの走行誘導方式、日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 856-867 (1993)
- [8] R. A. Brooks, A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE J. Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 14-23 (1986)
- [9] S. Tadokoro, Y. Ishikawa, T. Takebe and T. Takamori, Stochastic Prediction of Human Motion and Control of Robots in the Service of Humans, Proc. IEEE Intl. Conf. Systems, Man and Cybernetics, pp. 503-508 (1993)
- [10] 田所、石川、武部、高森、人間と共存協調するロボットのための回避行動の生成、(第1報、人間の運動の確率的予測とマニピュレータの回避計画)、日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 598, 1996 (掲載予定)
- [11] S. Tadokoro, T. Tanaka and T. Takamori, A Human Recognition System for Avoidance of Robot Accidents, Proc. of 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 2247-2252 (1991)
- [12] D. E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley Publ. (1989)
- [13] L. Davis、嘉数訳、遺伝アルゴリズムハンドブック、森北出版 (1994)
- [14] 山田、杉本、人間の痛覚耐性値の評価、日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 639-642, 1995
- [15] 山田、痛覚耐性値の評価とこれに基づく人間共存型ロボットのメカニズム、第1回 JSME ロボメカ・シンポジウム予稿集, 1996