ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定*

奥 富 正 敏** 森 政 弘***

ABSTRACT

In this paper a method of deciding robot's movement by means of potential field is proposed and simple simulations using it are shown. Especially two concepts, "State space for robots" and "Oval potential", are unique.

A robot which utilizes the proposed method has a potential field as what keeps informations about its surrounding situation. The field is formed in a space that represents the robot's state (state space). And the robot's state that is a point in the space moves according to the potential distribution.

The principal characteristics of this method are following.

- As a robot's state is represented by a point, the decision of movement can be made simply.
- And the oval potential is used for potential distribution, the robot's state moves successfully, the object is memorized by a little information and the calculation for the potential is easy.

Key words : potential field, state space, oval potential

この論文では、ポテンシャル場を用いた1つのロボットの動作決定法が提案され、それを用いた簡単なシミュレーションが示されている。特に、「ロボット用状態空間」と「楕円ポテンシャル」という2つの概念が特徴的である。

ここで提案される方法を用いるロボットは、まわりの状況に関する情報を保持するものとしてのポテンシャル場を持つ。それは、ロボットの状態を表す空間（状態空間）に形成される。そして、その空間内の点で表されるロボットの状態は、そのポテンシャル分布に従って変化する。

この方法の主な特徴は、次のようである。

- ロボットの状態を点で表すことにより、動作決定の際の処理が単純になされる。
- ポテンシャル分布として、楕円ポテンシャルを用いることにより、ロボットの状態がうまく変化し、また対象が少ない情報で記憶され、さらにその後の計算が簡単になる。

1. はじめに

われわれ人間が何か動作する時、あるいは思考し決定する時、必ずまわりの環境や状況に関する情報（あるいはその蓄積）が用いられる。同様に、ロボットもまわりの状況や自分の状態などを記憶し、それをもとにして、自らの動作を決定することが望ましい。その結果、ロボットに対する命令は、その一挙一動を事細かに指定する必要がないので簡単になる。さらにロボットがまわりの

状況を把握しているという意味で、融通性や信頼性があるともいえる。しかし、それはただ単にまわりの状況や自分の状態などの情報を記憶しているというだけでは意味がなく、動作決定に際し有効に、かつ迅速に利用されるものでなければならない。

本論文ではそれを、「ロボットの状態を表す空間（状態空間）におけるポテンシャル分布」という形で表現する。このポテンシャルとは、われわれがある物体が存在する時に、そのまわりの空間に感じる近寄りにくさとか危険度、あるいは魅力的引力といった雰囲気を表すようなものである。具体的には、ある目標に向かってポテンシャルは低くなり、逆に障害のまわりにはポテンシャルの山ができる。その勾配は、物体の性質やまわりの環境

原稿受付 1983 年 9 月 16 日

* Decision of Robot's Movement by Means of Potential Field

** 東京工業大学 工学部制御工学科 森 政弘研究室

*** 東京工業大学 工学部制御工学科

← Fig. 1 Potential Field (equi-potential line)
S : Start G : Goal

→ Fig. 2 Manipulator in potential field (It is difficult to decide the movement)

さらに主体の性質や動作目的などにより変化する。そして、個々の障害や目標などによるポテンシャルは合成され、1つのポテンシャル場が形成される。あとはそのポテンシャル分布に従って、ロボットの状態はポテンシャルの山々を避け、谷間を縫うように滑り下り、低い方へと変化してゆく (Fig. 1)。このような方法によれば、ポテンシャル場における動作決定は、極めて単純にかつ迅速になされる。これは、本提案の1つの大きな特徴であるが、そのためにはロボットやそのまわりの世界の特徴とか性質、あるいは目的などがあらかじめポテンシャル分布の中に含まれていなければならない。本論文ではその方法を論じ、さらにこれを簡単なロボットに適用した場合のシミュレーションを行って、その有用性と一般性を示す。

なお、ポテンシャルを用いたロボットの経路決定は既に発表されている¹⁾が、本論文は次の2つの点で大きく異なっている。

(1) 次章で述べる「状態空間」なるものを考え、ポテンシャル場を現実の空間にではなくその状態空間に形成する。

(2) ポテンシャル分布の形として、「楕円ポテンシャル」なるものを用い、かつそれが重要な働きをしている。

これらの利点については、次章以後に述べる。

2. ポテンシャルの求め方

2.1 状態空間

移動ロボットのような場合、まわりの世界の中の自分の位置をロボットの状態と考えれば、状態空間は、現実の空間とそのままだ対応する。しかし、たとえばマニピュレータなどの場合、現実の空間にそのまま対応する空間内にポテンシャルを与え、そこにマニピュレータを置いて、その動きを考えても、それは困難である (Fig. 2)。なぜなら、ポテンシャルは本来その空間内の各点に対し

与えられているものであるから、その空間内に腕のような形のあるものを持ってきても意味を持たない。仮に手先の点のポテンシャルを考えることにしても、一般に関節形の場合のように同じ手先の位置に対応するマニピュレータの状態は複数存在するし、さらに腕のそれ以外の部分をも考慮に入れねばならない。よって手先の位置のポテンシャルだけでは満足のいく制御は得られない。さらに、例えば各関節の位置や腕の各点のポテンシャルをも考慮することにしても、その動作決定アルゴリズムは複雑で技巧的になり、あまり一般性のないものになってしまうであろう。

そこでまず、ロボットのある1つの状態が1点に対応するような空間に変換する。この空間は、その各点がロボットの状態を表すものであるから、「状態空間」と呼ぶことにする。さらに、ある目標を実現する状態を目標状態、障害物などがあって、とり得ない状態を禁止状態と呼ぶことにする。そして、状態空間における、目標状態や禁止状態のまわりにポテンシャル分布を作り、それらを足し合わせて、ポテンシャル場を形成する。その中をロボットの状態を表す点が移動していく。その時の動作決定は、一旦ポテンシャル場が形成されてしまえば、もとのロボットの形状などにかかわらず、同様なアルゴリズムで行うことができる。

また、この状態空間の与え方はもちろん一通りではないが、これはロボットの動き方の特徴に直接影響することになる。これを利用すれば、ロボットの動き方の特徴を簡単に変えることもできる。

ここで、平面内で動く2関節マニピュレータの場合の状態空間との対応を例示する。Fig. 3 (a) で、マニピュレータは原点に固定されており、上腕と下腕の長さは等しく L である。ロボットの状態を表す変数として、図のように θ_1, θ_2 をとれば、(b) の状態空間が形成される。(a) で半径 $2L$ の円で表されるマニピュレータの動作領域は、(b) では一辺 2π の正方形になり、(a) のマニピュレータの状態は (b) の点Aに対応する。また目標として手先の位置の極座標 (r_g, θ_g) が与えられると

Fig. 3 2-jointed manipulator

すれば、それを実現する状態 (θ_1, θ_2) は、

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \pm \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r_g}{L} \right)^2 - 1 \right\} \\ \theta_1 &= \theta_g - \frac{\theta_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。

さらに、極座標 (r_o, θ_o) の位置に障害物がある時、腕がこれにぶつかる状態、すなわち禁止状態は、

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{K_o \cos(\theta_1 - \theta_o) - 1}{\sqrt{1 + K_o^2 - 2K_o \cos(\theta_1 - \theta_o)}} \\ \theta_o - \cos^{-1} \frac{K_o}{2} &\leq \theta_1 \leq \theta_o + \cos^{-1} \frac{K_o}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $K_o = r_o/L$

という式で表される。これらの式は、第3章のシミュレーションで用いられるが、たとえば、 $(r_g, \theta_g) = (1.1L, 1)$ 、 $(r_o, \theta_o) = (1.2L, 0)$ のとき、それらに対応する目標状態、禁止状態は Fig. 12(a) の G, prohibitive state で表されるようになる。

2.2 距離とポテンシャル

以下、2次元の状態空間において話を進める。

まず、ある目標状態や禁止状態（以下、対象と呼ぶ）からの「距離」という概念を定義する。ポテンシャルは、その距離の関数として求められる。その距離は「ある対象に、どれ位接近しているか」を表すものである。対象が点である時には、ある状態におけるその対象からの距離は、単に普通の意味での2点間の距離として求まるが、対象がある範囲を持つ図形で表されるような場合には、その対象からの距離を求めるには工夫が必要である。その説明は次節に譲る。

そして、距離からポテンシャルを求める関数 $\phi(D)$ としては、一般には、目標状態に対しては単調減少関数、禁止状態に対しては単調増加関数であるが、3章では、

$$\left. \begin{aligned} \text{目標状態に対しては、} \\ \phi_g(D) &= -k_g/D \\ \text{禁止状態に対しては、} \\ \phi_p(D) &= k_p/D^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

を用いている。ただし、 k_g, k_p はある定数で、ポテンシャルの勾配を決めるものである。また、 D はこの節で定義した距離 ($D \geq 0$) である。

(3) で、 $D \rightarrow 0$ (すなわち対象に近づく) に従って、目標状態ではポテンシャルが低くなり、禁止状態では逆に高くなるが、その影響は目標状態の方が広範囲に及ぶ。そして全体のポテンシャルは、各々の対象によるポテンシャルを足し合わせて、

$$\phi = \Sigma \phi_g + \Sigma \phi_p \quad (4)$$

として求まる。

2.3 楕円ポテンシャル

ある図形で表される対象のまわりのポテンシャル分布は、たとえば Fig. 4 のようなものが考えられる。この場合距離は、ある状態から対象までの最短距離として表される。このポテンシャル分布は、対象がロボットの動作領域の限界を与えるようなものの場合には適している。しかし、対象がそれを避けて通るべき禁止状態であるような場合には、これでは都合が悪い。なぜなら、Fig. 5 のような線分状の禁止状態が存在する時、P点とQ点のポテンシャルは等しい。そこで、Fig. 6 のようにGの位置に目標状態があるとすると、PはQよりポテンシャルが低くなってしまふ。これでは、Pから禁止状態

Fig. 4 Potential distribution

Fig. 5 Potential distribution around a linear prohibitive state

Fig. 6 Potential distribution composed of a linear prohibitive state and a goal state

Fig. 7 Potential distribution around a linear prohibitive state (oval potential)

Fig. 8 Distance from a polygon

Fig. 9 Potential distribution around a polygon (oval potential)

を避けてGに至ることはできない。そこで、次のようなポテンシャル分布を考える。すなわちで、Fig. 7で、点Pの状態の線分ABからの距離を、

$$D = \overline{PA} + \overline{PB} - \overline{AB} \quad (5)$$

とする。これにより求まる等ポテンシャル線は、図に示されているように、A, Bを焦点とする楕円になる。そこで、このポテンシャルを「楕円ポテンシャル」と名付ける。図で明らかのように、PのポテンシャルはQより高く、よって禁止状態の端の方に行こうとする傾向が生まれる。さらに、Fig. 8のように対象が凸多角形の場合は、まず凸多角形の頂点の中から、焦点 F_1, F_2 を決定する。それは、ある状態Pから凸多角形を見た時の左右の端の点(図ではAとC)である。そして対象からの距離は、

$$D = \overline{PF_1} + \overline{PF_2} - d_F \quad (6)$$

ただし、 d_F は、 F_1 と F_2 の間の凸多角形の輪郭の長さで、図の場合、 $d_F = \overline{AB} + \overline{BC}$ とする。この時の等ポテンシャル線は、楕円の一部をつなぎ合わせた形になる(Fig. 9)。

さらに、多角形のある等ポテンシャル線を与える距離 D を D' とし、(6)式の左辺に $-D'$ という項を付け加えれば、それにより求まる距離 D は先の等ポテンシャル線を輪郭に持つ図形(もし、元の多角形が点である時

には円、線分である時には楕円)からの距離を与える。したがって、頂点の座標と D' を記憶しておけば、Fig. 10のような図形のまわりのポテンシャルを求めることができる。

以上により、点、線分、凸多角形、円、楕円、凸多角形のある等ポテンシャル線で表される図形のまわりの楕円ポテンシャルが求まる。さらにそれ以外でも、図形を分割し、それぞれの楕円ポテンシャルの和をとるなどの方法で算出することが可能である。また、その等ポテンシャル線は $D=0$ の時、各図形の輪郭に一致し、 D が大きくなるに従い、円に近づいてゆく性質をもつ。この楕円ポテンシャルはさまざまな図形に対し、わずかの情報を用いて比較的容易に求めることができるので、本提案の中で重要な役割を果たしているものである。

3. シミュレーション

この章では、マイコン(富士通 FM-8)を用いて行ったシミュレーションの結果を示す。

まず、ある状態における動作決定はポテンシャルを微分して、その状態におけるポテンシャルの勾配を求め、その方向にある一定量だけ状態を変化させることにする。この方法を勾配法と呼ぶことにする。

すなわち勾配法では、一般に状態空間を形成する変数

Fig. 10 Potential distribution (oval potential)

を X, Y とし, 現在の状態を $X_N=(X_N, Y_N)$, ある対象の焦点を F_1, F_2 とすれば, (3), (6) 式より, 対象が目標状態の時,

$$\text{grad } \phi_g = \frac{k_g \left(\frac{X_N - F_1}{|X_N - F_1|} + \frac{X_N - F_2}{|X_N - F_2|} \right)}{(|X_N - F_1| + |X_N - F_2| - d_F)^2} \quad (7)$$

対象が禁止状態の時,

$$\text{grad } \phi_p = \frac{-2k_p \left(\frac{X_N - F_1}{|X_N - F_1|} + \frac{X_N - F_2}{|X_N - F_2|} \right)}{(|X_N - F_1| + |X_N - F_2| - d_F)^3} \quad (8)$$

となり, (4) 式より,

$$\text{grad } \phi = \Sigma \text{grad } \phi_g + \Sigma \text{grad } \phi_p \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \text{grad } \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial X}, \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)$$

で, ある状態におけるポテンシャルの勾配が求められる。

その時, 次の状態 $X_{N+1}(X_{N+1}, Y_{N+1})$ は,

$$X_{N+1} = X_N - \Delta S \cdot \frac{\text{grad } \phi(X_N, Y_N)}{|\text{grad } \phi(X_N, Y_N)|} \quad (10)$$

となる。ただし ΔS は, ある一定の状態の変化量であり, $\Delta S = |X_{N+1} - X_N|$ である。

はじめに, ポテンシャル場(状態空間)の中での状態

Fig. 12 Simulation for a 2-jointed manipulator ($k_p/k_g=1/100$)

Fig. 13 ($k_p/k_g=1/100$)

Fig. 11 Simulation of the movement in a potential field

の動き方を Fig. 11 に示す。図で黒く塗りつぶされた部分が禁止状態, G が目標状態である。ロボットの状態は, S から出発して順次状態を変えてゆき, G に至っている。ここでは, 一回の状態の変化量は一定なので, ポテンシャルの勾配ベクトルの方向だけを用い, その大きさは用いていない。したがって, (7), (8) 式における k_p, k_g

は, その比 k_p/k_g だけが問題となる。図からわかるように k_p/k_g が大きい程, 禁止状態を大きく避けるようになる。この値は, 禁止状態の性質はもちろん, その作業空間全体との相対的な大きさ, まわりの状況やロボットの性質などを考慮して決定されるべきものである。

次に, 2.1 で述べた 2 関節マニピュレータのシミュレーション結果を示す。ここでは, ある任意の状態にあるマニピュレータに対し, 目標と障害物(今回のシミュレーションでは点に限っている)の位置のみを指定し, あとはマニピュレータが自らの状態空間の中に, それらに対応する目標状態, 禁止状態を発生してポテンシャル場を形成し, それに従って腕を動かしてゆくことを想定する。但し, (7)~(10) 式で, $X=\theta_1, Y=\theta_2, -\pi \leq \theta_1, \theta_2 \leq \pi$ である。さらにこの例では, 実用上問題とならないので, 計算上禁止状態を両端を結ぶ線分で近似している。

Fig. 12 で, (a) は状態空間の中の動き, (b) はそれに対応する現

実の空間でのマニピュレータの動きである。ここで、

S : 初期状態

G : 目標状態

G_0 : 目標位置

O_b : 障害物の位置

を表す。

Fig. 13 も同様で、目標位置だけを変えた場合であるが、上記とは腕の曲げ方は逆になっている。

ここで、 k_p/k_g の違いによる性質は3章の場合と同様であるが、この値を固定したままだと最終的に目標に到達できない場合も生じる。それはポテンシャルの盆地のようなものが生じて、そこに状態が入ると、勾配法では二度と出られないためである。このような時は、 k_p/k_g を大きくしておくことにより、目標に到達できるようになるが、当然禁止状態を大きく避けて通ようになる。

このような時、 k_p/k_g をあらかじめ大きく取っておかなくてもすむような方法もある。その1つは、動きながら状況に応じて k_p/k_g を変えてゆくもので、たとえば

Fig. 14
Change of state

マニピュレータの状態が前にとった同じような状態に戻ってきた時には、 k_p/k_g を少し大きくするようにする。この方法では、盆地に入り込んだ時にポテンシャル分布を少しずつ変えて脱出することになる。

またそのような時、分布を変えなくてもポテンシャルの谷間に沿って、坂を登り、脱出するようにする方法もある。そのためには動作決定法を変えなければならない。

Fig. 15 ($k_p/k_g=1/100$)

ここまで用いた勾配法では、ある状態を表す点のポテンシャルの勾配から、状態変化の方向を決定していたが、今度はその点のまわりに $4S$ だけ離れた点のポテンシャルを比較して、その最も低い所に行くようにし、さらにその変化の方向を前方に限定する。これを比較決定法と呼ぶことにする。ここでは Fig. 14 のように、次の状態は前の状態変化の方向から $\pm 45^\circ$ 以内の $4S$ だけ離れた 5 つに限定し、そのポテンシャルの最も低い状態に移るようにした。

Fig. 15 は、この方法によるシミュレーションである（ここでは動きの経過がわかるように、1~11 に分割して示した）。この場合先の勾配法では、 k_p/k_d の値を Fig. 12, 13 の 15 倍程度にしないと到達できない。一方比較決定法では、なめらかに状態を変化させようとすると、比較する点の数を増やさなければならず、それに伴って計算時間も長くなってしまいが、かなりタフに目標に向かってゆくことができるので有利である。

4. 結 論

本論文で述べた方法の主要な特徴は、

(1) ロボットの状態が点で表されるような空間（状態空間）にポテンシャルを与え、それを利用して状態を変化させている。このため、動作決定の際の処理が単純な方法となっている。さらに、状態空間を形成する変数を変えることにより、動作の特徴を変えることができる。但し、いろいろな場合に対するその変数の選び方や、現

実の空間の物体を状態空間に写像する方法、及びその近似法などは、今後さらに研究する必要がある。

(2) 状態空間における対象のまわりのポテンシャル分布として、楕円ポテンシャルを用いている。それは、対象を避ける際に（場合によっては近づく際にも）有利であり、さらに対象を少ない情報で記憶し、それから簡単にポテンシャルを算出することができるという点で大変有用である。

という 2 点であるが、さらに一般的に利用するために残された課題も多い。しかしながらここで述べた方法は、われわれがさまざまな状況に際して、ロボットの動作決定の問題を扱う時の、ある 1 つの思考的基礎を与えうるものであると期待する。

最後に、本論文をまとめるにあたり協力していただいた、越田陽子事務官と小川敏一助手ならびに研究室一同に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) O. Khatib, J.-F. Le Maitre, "Dynamic Control of Manipulators Operating in a Complex Environment", 3rd CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Sept., 1978.
- 2) Neville Hogan, "Impedance Control of a Robotic Manipulator", Paper presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Nov., 1981.
- 3) A. A. Petrov, I. M. Sirota, "Control of a Robot-manipulator with Obstacle Avoidance under Little Information about the Environment", IFAC, 1981.

奥富正敏

(Masatoshi OKUTOMI)

昭和 56 年 3 月東京大学工学部計数工学科卒業、昭和 58 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。キャノン(株)勤務。

森 政弘 (Masahiro MORI)

昭和 25 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業、昭和 34 年 3 月東京大学助教授、昭和 44 年 3 月東京工業大学教授、昭和 26 年より自動制御と自動化の研究に着手、昭和 34 年に指の研究を始め、それをロボットの研究へと拡大して今日に至る。