天井クレーンにおける荷物の回転を考慮した経路計画と
障害物回避制御*

(第1報, 荷物の回転動作を考慮した経路計画)

三好孝典^{*1}, 川上祥雄^{*2}, 寺嶋一彦^{*1}Path Planning and Obstacle Avoidance Control Considering
Rotary Motion of Load for Overhead Crane
(1st Report, Path Planning Considering Rotary Motion of Load)Takanori MIYOSHI^{*3}, Sachio KAWAKAMI and Kazuhiko TERASHIMA^{*3} Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

In this paper, the path planning considering rotary motion of load is presented for autous overhead crane. First, we give the condition of interference between a rectangular load and obstacles, and a movable area without interference is decided in the configuration space. Secondly, a secure path planning is derived by the potential method based on extended 3-dimensional diffusion equation considering rotary motion. Furthermore, the parameter of suppressing rotary motion in the extended diffusion equation is clarified, and its effect is demonstrated. Finally, Quadratic curved surface interpolation method is proposed to get the smooth path planning, and the effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulation results.

Key Words: Overhead Crane, Posture Control, Obstacle Avoidance, Path Planning, Diffusion Process, Potential Method

1. は じ め に

作業者の手動操作による天井クレーンは多くの工場内の荷物輸送に用いられている。クレーンの操作は荷物の振れ止め, 位置決めが難しく, その操作は熟練操縦者の手に委ねられてきた。しかし, 近年の労働環境では人件費削減や作業効率の追求が求められることから, 操縦者を必要としない自律的天井クレーンシステムの構築が期待されている。また, 天井クレーンでは棒, 板, 管のような長尺物も頻繁に搬送するため, 丈の高い障害物が周辺に分散した工場内では, 荷物の水平動作と回転により障害物を回避するクレーンが必要とされる。そこで, 本研究では荷物の回転を考慮した経路計画と荷物の位置・姿勢制御を行うクレーンシステムの構築を行う。本論文ではその第一報として荷物の回転を考慮した経路計画について述べる。

経路計画に関する研究はロボット・マニピュレータ

の分野で盛んに行われている。Schmidtらの拡散方程式に基づくポテンシャル法⁽¹⁾や楊らの人工ポテンシャル法を用いた方法⁽²⁾, グラフ理論を用いた方法⁽³⁾⁽⁴⁾, GAを利用した研究⁽⁵⁾等が行われているが, 多数の障害物が存在するクレーンの搬送環境においては, 計算時間短縮の点でポテンシャル法による方法が有効に思われる。また, 経路計画に関する研究のほとんどは障害物を円柱や直方体等の簡単な形状で予め与えており, 障害物認識により得られた障害物環境への適用についてはふれていないものが多い。

クレーンの経路計画に関する研究では, 著者らのグループが最小エネルギー, 最短距離となる搬送経路を分枝限定法によって導出している⁽⁶⁾。この方法は搬送領域内の障害物を多角形で近似し, その頂点をサブゴールとする搬送パターンのうち, 実現可能で評価関数を最小とする経路を効率的に探索するものである。しかし, 当該手法は障害物の頂点の個数に応じて搬送パターンが増加し, 演算量が指数関数的に増大するという欠点を有している。このため, 本論文における回転動作を取り扱おうとした場合, 回転角度ごとに多大な搬送パターンが形成され, 現実的な時間内での経路の

* 原稿受付 2004年5月18日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学工学部(☎441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} マツダ(株)(☎730-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1)。

E-mail: miyoshi@procon.tutpse.tut.ac.jp

求解は困難である。

一方、同グループは拡散方程式に基づくポテンシャル法を3次元に拡張し、荷物の3次元搬送経路を導出している⁽⁷⁾。この方法は、ゴール地点より仮想物質を拡散させ、スタート地点よりその濃度勾配をたどることで経路を生成している。拡散方程式によるポテンシャル法は人工ポテンシャル法で問題となるデッドロックが発生しないため、あらゆる障害物環境において経路を生成できる。しかし、これらの研究では荷物はすべて円柱として近似するため、荷物が長尺物の場合、それを内包できる極めて大きな円柱を荷物として取り扱うことになり、搬送経路を見出せなくなる場合が生じる。

そこで本論文では拡散方程式に基づくポテンシャル法を、従来の位置座標系と共に、回転座標を加えて次元の拡張を行い、従来の研究では実現できなかった位置・姿勢の情報を含んだ経路計画法を提案する。第2章では荷物と障害物との衝突判定及び移動可能領域の決定を行うことで、配置空間を従来の位置のみの次元から回転軸を含んだ次元に拡張する。第3章では拡張された配置空間にポテンシャル法を適用することで、位置・姿勢を考慮した経路計画を行う。第4章では最大勾配方向を用いて滑らかな経路を生成する2次曲面補間法を提案する。本手法では荷物姿勢を積極的に考慮することで、狭い障害物の間隙さえも縫うことができる経路生成が可能となる。なお、本論文では位置座標を、提案手法の本質を理解しやすいよう (x, y) の2次元に限定しているが、 (x, y, z) の3次元に拡張することは容易である。

2. 衝突判定と移動可能領域の決定

2.1 障害物との衝突判定 クレーンの荷物が、与えられたスタート地点からゴール地点までの間の障害物を回避し安全に搬送されるためには、まず、荷物がどのような位置・姿勢のときに障害物と衝突するかを判定しなければならない。荷物を長方形としたとき、荷物と障害物の位置関係を図1のように考えると、衝突の条件は次式で与えられる。

$$\begin{cases} |(x_p - x_o) \cos \theta_o + (y_p - y_o) \sin \theta_o| \leq \frac{l_x}{2} \\ |(x_o - x_p) \sin \theta_o + (y_p - y_o) \cos \theta_o| \leq \frac{l_y}{2} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 (x_p, y_p) は障害物の位置、 (x_o, y_o) は荷物の中心位置、 (l_x, l_y) は荷物の長さ、 θ_o は y 軸を基準とし、反時計方向を正とする荷物の回転角である。また、図の座標系は右手座標系とし、 z 方向は紙面より手前向きとする。

Fig. 1 Criterion of geometrical interference

(1)式は以下のようにして得られる。まず、荷物の側面 AB を考える。ベクトル T は、荷物中心を通り y 軸に平行な線と荷物の側面が交わる y 切片 $Q(0, \frac{l_y}{2\sin\theta_o}, 0)$ を始点として、荷物内面を右に見て側面に沿う単位ベクトルで、ベクトル P は点 Q から障害物へ向かうベクトルである。もし、外積 $T \times P = (\sin\theta_o, -\cos\theta_o, 0) \times (x_p - x_o, y_p - y_o - \frac{l_y}{2\sin\theta_o}, 0)$ の z 軸成分が正であれば、角度 ϕ は $0 < \phi < \pi$ で障害物は荷物の一辺 AB に対し外側に存在する。逆に外積が負であれば角度 ϕ は $0 > \phi > -\pi$ で、障害物は荷物の内側に存在する。荷物の側面 CD に関しても図の $T' = (-\sin\theta_o, \cos\theta_o, 0)$ 、 $P' = (x_p - x_o, y_p - y_o + \frac{l_y}{2\sin\theta_o}, 0)$ により同様に判定できる。結局、ともにベクトルの z 軸成分が負のときに障害物は側面 AB, CD で囲まれた領域に障害物が存在、すなわち荷物と障害物が衝突していると判定でき、第一式を得る。一方、側面 DA に関しては、ベクトル P'' の始点 R は $(0, \frac{l_y}{2\cos\theta_o}, 0)$ となり、 $P'' \times T'' = (\cos\theta_o, \sin\theta_o, 0) \times (x_p - x_o, y_p - y_o - \frac{l_y}{2\cos\theta_o}, 0)$ の z 軸成分が負であれば側面 DA を延長した領域内に障害物が存在し、側面 BC に関しても同様に考えて第二式を得る。

さらに、荷物や障害物の高さを考慮した (x, y, z) の3次元空間での衝突判定を行う場合には、(1)式の衝突の条件に加え、次式を追加すればよい。

$$z_o - z_p \leq \frac{l_z}{2} \quad (2)$$

ここで、 z_p は障害物の高さ、 z_o は荷物中心高さ、 l_z は荷物の高さである。

2.2 移動可能領域の決定 これまでに、障害物回避を目的とした経路計画法として拡散プロセスを利用したポテンシャル法が報告されている⁽¹⁾⁽⁷⁾。これらの研究では x, y, z 方向へ荷物を動かすことにより障害物回避を実現しているが、本論文では位置と姿勢を同時に制御し、 (x, y, z) から (x, y, z, θ) へと拡張する。こ

ここで、本論文では θ 軸への拡張が本質であるので、荷物の水平移動と回転によって障害物回避を実現することを考え、拡散プロセスに用いる配置空間を (x, y, z) から (x, y, θ) 座標へ拡張する。

図2に x, y, θ 軸に拡張された配置空間を示す。配置空間は第2報で報告する実験領域を考慮して $2.0[\text{m}] \times 1.0[\text{m}]$ とした。図において垂直方向は荷物の回転角 θ を表している。ここで、荷物は $0.1[\text{m}] \times 0.5[\text{m}]$ の長方形と仮定し、搬送領域内に2つの障害物 ($0.25[\text{m}] \times 0.35[\text{m}], 0.3[\text{m}] \times 0.35[\text{m}]$) を想定している。また、搬送領域の周囲は壁で囲まれているものとする。荷物の中心が存在できる位置は図の空白領域であ

Fig. 2 Extended positioning space and movable area

る。もし $\times$ 印に中心が存在するならば、障害物や周囲の壁に対し衝突する。 $\times$ 印は前節の衝突判定により求めることができる。以下に手順を示す。

- (1) 対象となる3次元搬送領域 (x, y, θ) をメッシュで区切り、障害物を該当するメッシュ交点（以下グリッドと呼ぶ）に配置する。
- (2) あるグリッド (x_0, y_0, θ_0) において、この場所に荷物の中心が存在できるかどうかを荷物が届き得る障害物グリッドすべてに対して(1)式により判定する。1グリッドでも衝突すればその場所を干渉点と呼び、それを $\times$ 印で表す。
- (3) (2)の計算を障害物以外のすべてのグリッドに対して施す。

なお、図1における Δh が x, y に関するメッシュの幅で、本論文の場合 $0.05[\text{m}]$ とした。また、 θ に関するメッシュ幅 $\Delta \theta$ は $5[\text{deg}]$ とした。これ以上メッシュを細しても計算時間の増大を招くだけで、生成される経路にはほとんど影響を与えない。また、図2において障害物の位置は荷物の回転角 θ に依存しないので、障害物は θ の断面図上の常に同じ位置に存在する。以

上のアルゴリズムを用いて得られた移動可能領域の内部に、障害物と衝突しない経路が存在する。なお、ここで取り扱う荷物の長さを実際の長さより大きくすれば、より安全な経路を生成することができる。

3. 拡散方程式に基づくポテンシャル法

3.1 ポテンシャル法による濃度勾配の導出 安全な経路を得るために、(3)式の拡散方程式に基づいて離散化された拡散プロセス(4)式を用い、スタート地点からゴール地点までの経路計画を行う。ここで λ は回転を抑制するために導入した拡散抑制係数で、詳細は3.3節で述べる。また、(4)式の導出は付録に示す。

3次元拡散方程式：

$$\frac{\partial C(x, y, \theta)}{\partial t} = D \operatorname{div} \operatorname{grad} C(x, y, \theta) = D \nabla^2 C(x, y, \theta) \quad (3)$$

離散化された3次元拡散方程式：

$$C_{t+1, i, j, k} = (1 - 4r - 2r\lambda) C_{t, i, j, k} + r(C_{t, i+1, j, k} + C_{t, i, j+1, k} + \lambda C_{t, i, j, k+1} + C_{t, i-1, j, k} + C_{t, i, j-1, k} + \lambda C_{t, i, j, k-1}) \quad (4)$$

ここで $C(x, y, \theta)$ は溶質濃度、 $C_{t, i, j, k}$ はサンプリング時刻 t における x, y, θ に関する i, j, k 番目のグリッドの溶質濃度、 $D(>0)$ は拡散係数、 r は $0 < r \leq 1/6$ の拡散の程度を決定する定数で、本論文では濃度が振動せずかつ拡散が起こりやすい $r = 1/6.5$ を採用した。また、 $\lambda = (\Delta h / \Delta \theta)^2 = 1$ とした。以下に拡散方程式によるポテンシャル法の計算手順を示す。

[拡散方程式に基づくポテンシャル値の計算手順]

- (1) 境界条件として、ゴール地点のグリッド $G = (i_g, j_g, k_g)$ に濃度 $C_{t, G} = 1$ を与える。さらに、全ての干渉点（図2の $\times$ 印）、および配置空間の周囲のグリッド（壁）に濃度 $C_{t, i, j, k} = 0$ を与える。これらの濃度は(3)以降の演算により更新されない。
- (2) 初期条件 $t = 0$ として、上記以外のグリッド $C_{0, i, j, k}$ に濃度 $C = 0$ を与える。
- (3) (4)式に基づいて、障害物と衝突しない全グリッドの濃度を更新する。すなわち i, j, k 地点における次の時刻の濃度 $C_{t+1, i, j, k}$ を現時刻の濃度 $C_{t, i, j, k}$ と x, y 軸における前後のグリッドの濃度 $C_{t, i+1, j, k}, C_{t, i, j+1, k}, C_{t, i-1, j, k}, C_{t, i, j-1, k}$ 、および、回転角 θ における上下のグリッド（現時点の回転角から $\pm \Delta \theta$ ）の濃度 $C_{t, i, j, k-1}, C_{t, i, j, k+1}$ の線形演算から求める。
- (4) 拡散プロセスが終了判定条件を満足するまで(3)の演算を繰り返す。□

拡散プロセスの終了判定には次式を用いる.

$$\frac{|C_{t,s} - C_{t-1,s}|}{C_{t,s}} \leq \varepsilon \quad (5)$$

ここで, $C_{t,s}$ は時刻 t におけるスタート地点 $S = (i_s, j_s, k_s)$ の濃度である. ε を小さくし, 濃度を定常状態に近づけると, 生成される経路は障害物から遠ざかる傾向があるが, 計算時間は増大する. 本論文では試行錯誤的にそれ以上拡散プロセスを繰り返してもほとんど経路は変化しない値 $\varepsilon = 0.05$ を選択した.

まず, 簡単に拡散のイメージを把握するため, (4)式において θ を考慮せずに拡散プロセスを施した結果を図3に示す. 図において, 平面の軸はそれぞれ x, y 軸の座標を, 垂直軸は濃度を表す. 図の円で囲まれた部分が障害物のエリアで, 境界条件より濃度が0と規定される. ゴールポイントにおいて濃度が最も高く ($C=1$), スタートポイントまで徐々に拡散し, 濃度が小さくなっていくことがわかる. 障害物は境界条件より $C=0$ と制約されるため, その周辺はいわば崖のような形状を持つ.

Fig. 3 Diffusion process without considering rotation angle θ

図4は, θ も考慮して第2.2節で求められた配置空間に拡散プロセスを施した結果である. (x, y, θ, C) の4次元空間となるため, 矢印で濃度勾配の大きさと方向を示している.

3.2 障害物回避経路の決定 安全な障害物回避経路は図4の濃度勾配が大きいグリッドをスタート地点からゴール地点までたどることによって得られる.

図3に, 回転 θ を考えない場合の経路を太線で重ねて示す. 本研究のアルゴリズムでは, スタートポイントから常に濃度の高い方をめざして経路が決定されるため, いわば尾根づたいの経路が選択される. したがって, 障害物の存在する谷や崖の領域には近寄らないため, 安全性の高い経路が確保される.

θ を考慮した場合の経路を図2に重ねて示す. 初めにスタート地点で荷物の回転角は $\theta = 0$ である. ス

Fig. 4 Diffusion process considering posture control

タート地点において荷物の周囲は干渉点で囲まれているため, このままの姿勢では障害物の間を通ることができない. そこで, 回転運動を行い (図2の実線), 障害物の間を移動し (図2の一点鎖線), 指定された姿勢になるよう再び回転動作を行う (図2の破線). 本例では, グリッド数 $21(x \text{ 軸}) \times 41(y \text{ 軸}) \times 72(z \text{ 軸}) = 61992$ 点であり, 移動可能領域の決定と拡散プロセスにそれぞれ5[s]程度 (拡散回数は186回) の計算時間を要した (Athlon900MHz).

図5に x - y 平面に展開した経路を示す. 搬送経路が障害物に干渉していないことが確認できる. しかし, 図5の経路は滑らかとはいえず, クレーンの荷物経路としては適用できない. 滑らかな荷物経路を導出する方法については第4章で述べる.

Fig. 5 The path planning by tracing max concentration

さて, 本ポテンシャル法によれば, 安全な経路が導出できることは先に述べたが, 必要以上に障害物を迂回するような経路が生成されることはないのであろうか. その考察を以下に示す.

図6は灰色四角部の障害物を回避して, 手前の三角点から奥の丸点へバスプランニングを行った場合の経

Fig. 6 The path planning with wide space

Fig. 7 Diffusion process with wide space

路である。障害物の右側に大きく開かれた余白の領域があるが、その部分は経路として選択されず、障害物近傍を通る経路が生成されている。図7は本例のポテンシャル場で、見やすさのため周囲の領域境界のポテンシャル場は除去してある。右半面の障害物の存在しない領域では濃度差が生じにくいいため、なだらかな勾配でポテンシャル場が領域境界に向かって傾斜していることがわかる。一方、障害物と領域境界では急激に濃度が0に制約されている。経路は比較的障害物近傍に、緩やかな勾配と急勾配の崖の屈曲点部分に障害物を取り囲むように生成される。なぜならば、余白部分では一方向に緩やかな勾配を持つため、濃度の勾配が変化する尾根の部分がなく、経路としては選択されないためである。この性質に対する物理的な説明としては、「濃度が最も伝わり易いのは、障害物を回避しつつ、スタート地点とゴール地点をできるだけ短い距離で結ぶ経路である。」と言える。

ただし、障害物が入り組んだり狭い間隙が存在する状況では濃度が伝わりにくく、たとえ距離が短くとも経路として選択されない場合がある。しかしこのような状況下では、仮に狭間隙が経路として選択されたとしても、衝突回避のためにゆっくりとした搬送しか許容されない場合があり、むしろ遠回りになろうとも濃度の伝わり易い広がりのある経路を選択した方が高速搬送を実現できる場合があることに留意されたい。なお、本例では簡単のため x, y 平面上の障害物回避を取り扱ったが、 z, θ 軸に拡張しても特徴は失われない。

3.3 荷物の回転抑制 天井クレーンはロープで荷物を吊るすために急激な回転動作が加わるとロープのねじれが発生する。ロープのねじれは荷物の水平方向の振動と比べ周期が長く、制御に時間を要する。このことから、必要最小限の回転動作で障害物回避を行うことが好ましい。そこで、(4)式の λ を操作することで荷物の回転抑制を行う。ここで、 λ を回転抑制係数と呼ぶことにする。

$\lambda = (\Delta h / \Delta \theta)^2$ の定義より、 λ は θ 軸の単位 [deg] を x, y 軸の単位 [m] に変換する換算係数として捉えることができる。 $\Delta h = 0.05[\text{m}]$ で $\lambda = 1$ のとき、 θ 軸の1グリッド分の角度 $\Delta \theta = 5[\text{deg}]$ は $0.05[\text{m}]$ として、 $\lambda = 0.01$ のとき $\Delta \theta = 5[\text{deg}]$ は $0.5[\text{m}]$ として解釈される。従って、拡散プロセスにおいて回転抑制係数 λ を小さくすることによって、 θ 軸のグリッドをより遠方に存在するグリッドと見なすことができるため、 θ 軸方向への拡散は抑制される。結果的に最大濃度方向が x, y 軸方向に向きやすくなり、荷物の回転は抑制される。なお、von Neumann の安定性解析より、ポテンシャル場を安定に整定させるためには、回転抑制係数を $0 < \lambda \leq (1/2r) - 2$ の範囲で選択しなければならない⁽⁸⁾。

図8に $\lambda = 0.01$ とした経路生成結果を、図9に $\lambda = 1$ との各グリッドにおける回転角の比較を示す。図5の $\lambda = 1$ の場合と荷物回転角度 θ の推移を比較すると、ゴール地点までに経由するグリッド数は同じにもかかわらず、図9より、最大で $30[\text{deg}]$ まで回転角度 θ は抑制されている。以上のことから、 λ を小さくすることによって冗長な回転運動を抑制し、搬送時間の短縮を実現する軌道生成が期待できる。

Fig. 8 The path planning suppressing rotary motion

Fig. 9 Comparison with rotary angle with respect to λ

4. 2次曲面補間法

拡散方程式に基づくポテンシャル法では、拡散プロセスを離散化した空間に施すことでポテンシャル場を生成している。経路生成において前述の離散化された最大濃度グリッドを選択する方法では、滑らかな経路を得るためにはメッシュの幅を細かくしなければならず、計算時間はべき乗数で増大する。そこで、本論文では2次曲面補間法と称する最大濃度方向を推定するアルゴリズムを新たに提案する。これはSchmidtらの2次勾配補間法⁽¹⁾を3次元の配置空間に適用できるような拡張したものである。

まず、図10に示すポテンシャル場内の任意の位置 (x, y, θ) を中心とする半径 R の球を考える。この球面上の点 (x_f, y_f, θ_f) は方位角 ϕ と仰角 ψ を用いて、次式で与えられる。

$$\begin{cases} x_f = x + R \cos \phi \cos \psi \\ y_f = y + R \sin \phi \cos \psi \\ \theta_f = \theta + R \sin \psi \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 10 The sphere of arranged grid intersection points

Fig. 11 Quadratic curved surface in ϕ - ψ plane

ここで、 ϕ, ψ から成る ϕ - ψ 平面上的濃度分布 $C(\phi, \psi)$ を考え、これを図11のような2次曲面と仮定すると、

$C(\phi, \psi)$ は ϕ, ψ に関する2次式で表される。

$$C(\phi, \psi) = a\phi^2 + b\psi^2 + c\phi + d\psi + e \quad (7)$$

ここで、 a, b, c, d, e は濃度分布を表す未知パラメータである。また、最大濃度となる方位角を $\phi_{\max}$ 、仰角を $\psi_{\max}$ とすると、 $\partial C / \partial \phi = \partial C / \partial \psi = 0$ より、

$$\phi_{\max} = -\frac{c}{2a}, \quad \psi_{\max} = -\frac{d}{2b} \quad (8)$$

となる。(7)式の未知パラメータを決定し、最大濃度方向を得るには5組の $C(\phi, \psi)$ を選択し、 $a \sim e$ に関する5元連立2次方程式を解けばよい。そこで、図10のように ϕ, ψ を角度 ξ で区切り、球面上に等間隔の格子をつくる(図10破線)。この格子交点の中から最大濃度の格子交点(図10●印)と、周囲4点の格子交点(図10○印)の計5点を選択した時、最大濃度方向 $\phi_{\max}, \psi_{\max}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= \frac{4\phi_m C_{m,n} - (2\phi_m + \xi)C_{m-1,n} - (2\phi_m - \xi)C_{m+1,n}}{4C_{m,n} - 2C_{m-1,n} - 2C_{m+1,n}} \\ \psi_{\max} &= \frac{4\psi_n C_{m,n} - (2\psi_n + \xi)C_{m,n-1} - (2\psi_n - \xi)C_{m,n+1}}{4C_{m,n} - 2C_{m,n-1} - 2C_{m,n+1}} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 ϕ_m, ψ_n は最大濃度となる格子交点の方位角、仰角であり、 $C_{m,n}$ はその格子交点の濃度である。スタート地点から最大濃度となる $\phi_{\max}, \psi_{\max}$ の方向に常に移動していけば障害物に衝突せず、なおかつ滑らかな軌道を生じ得る。なお、(9)式は(7)式に関する5元連立2次方程式と(8)式の関係から容易に得られる。

さて、 ϕ, ψ で与えられる格子交点は必ずしも第3章で示したグリッドとは一致しない。そこで、濃度 $C(\phi, \psi)$ は近傍の既知のグリッド濃度から補間によって求める必要がある。従って、図12に示されるような濃度空間内における任意点の濃度 $C(\phi, \psi)$ を次式から導出する。

$$\begin{aligned} C(\phi, \psi) &= C(x_f, y_f, \theta_f) \\ &= C(x + R \cos \phi \cos \psi, y + R \sin \phi \cos \psi, \theta + R \sin \psi) \\ &= C_{i,j,k} + (C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k})(\hat{x} - i) \\ &\quad + (C_{i,j+1,k} - C_{i,j,k})(\hat{y} - j) + (C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k})(\hat{\theta} - k) \\ &\quad + (C_{i,j,k} - C_{i+1,j,k} - C_{i,j+1,k} + C_{i+1,j+1,k})(\hat{x}\hat{y} - i\hat{y} - \hat{x}j + ij) \\ &\quad + (C_{i,j,k} - C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k+1} + C_{i+1,j,k+1})(\hat{x}\hat{\theta} - i\hat{\theta} - \hat{x}k + ik) \\ &\quad + (C_{i,j,k} - C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k+1} + C_{i,j+1,k+1})(\hat{y}\hat{\theta} - j\hat{\theta} - \hat{y}k + jk) \\ &\quad + (C_{i,j,k} - C_{i+1,j,k} - C_{i,j+1,k} + C_{i+1,j+1,k} \\ &\quad - C_{i,j,k+1} + C_{i+1,j,k+1} + C_{i,j+1,k+1} - C_{i+1,j+1,k+1}) \\ &\quad \times (\hat{x}\hat{y}\hat{\theta} + i\hat{y}\hat{\theta} + \hat{x}j\hat{\theta} + \hat{x}\hat{y}k - i\hat{j}\hat{\theta} - i\hat{y}k - \hat{x}jk + ijk) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, i, j, k はそれぞれ x, y, θ 軸方向のグリッド番号, $C_{i,j,k}$ は (i, j, k) グリッドにおける濃度値, $\hat{x} = (x + R \cos \phi \cos \psi) / \Delta h$, $\hat{y} = (y + R \sin \phi \cos \psi) / \Delta h$, $\hat{\theta} = (\theta + R \sin \psi) / \Delta \theta$ である. (10) 式は濃度 $C(\phi, \psi)$ を周囲に存在する 8 点のグリッドの濃度値から線形補間したものである.

Fig. 12 Interpolation of concentration at the optional point

2 次曲面補間法による経路生成の手順を以下にまとめる.

[2 次曲面補間法による経路生成の手順]

- (1) 既知の障害物環境及び搬送目的地点 $C_{i,G}$ に対し, 拡散方程式に基づくポテンシャル値の計算を終了判定条件が満足されるまで行う.
- (2) 球体半径 R と分割角度 ξ を設定し, 現在地点 (x, y, θ) にスタート地点を入力する.
- (3) 現在地点 (x, y, θ) を中心とする半径 R の球面上に, 方位角 ϕ , 仰角 ψ をそれぞれ ξ で等間隔に区切り, 格子交点を決定する.
- (4) 各格子交点の濃度を (10) 式より求め, その中から最大濃度となる格子交点と周囲 4 つの格子交点を選択する.
- (5) (3) で選択した格子交点の角度, 濃度を用いて, (9) 式から最大濃度方向 $\phi_{\max}, \psi_{\max}$ を求める.
- (6) 現在地点から最大濃度方向へ微小量 d だけ移動する. ゴール地点に十分近ければ終了, それ以外は (2) へ戻る. □

球体半径 R を大きくすることは現在位置から遠くの濃度を用いることを意味するため, 近隣の障害物を無視してしまう可能性がある. このため R はポテンシャル場のグリッド幅がそれよりやや大きな値に設定するとよい. また, ξ は小さく設定すると, 最大濃度グリッドを選択して得る経路に近くなり, 大きくすると滑らかな経路となる傾向がある.

図 4 のポテンシャル場に対し, 2 次曲面補間法を用いた経路計画結果を図 13 に示す. ここで, 球体半径

$R = 0.05[\text{m}]$, 分割角度 $\xi = 20[\text{deg}]$, 1 ステップ当りの移動量 $d = 1.0 \times 10^{-3}[\text{m}]$, $\lambda = 0.01$ とした.

Fig. 13 The path planning by quadratic curved surface interpolation method

最大濃度グリッドを選択した図 8 と比較すると, ほぼ同様の軌跡を示すが, 生成された経路は滑らかである. 表 1 にそれぞれの方法における搬送距離と回転角度の総和を示す. ここで, 総和とは各ステップ (微小区間 d 進むことを 1 ステップとする) の距離, 角度の絶対値をとり, 全ステップの合計をとったものである. 2 次曲面補間法では経路が滑らかになることにより搬送距離は 5~10% ほど短くなった. これは最大濃度グリッド上のみを移動する経路は x, y 軸方向への移動に関して冗長な経路が多いためと考えられる. また, 回転の総和は両手法とも $\lambda = 1$ よりも $\lambda = 0.01$ のときに小さくなっていることから, 回転抑制の効果が確認できる. 以上のことから回転抑制係数 λ による回転抑制と 2 次曲面補間法による経路をクレーンの荷物軌道に用いることは有効だと結論づけられる.

Table 1 Comparison with each path planning methods

Method	λ	Conveyance distance [m]	Total rotary angle [deg]
Tracing max concentration	0.01	1.93	90.0
	1	1.84	150.0
Quadratic curved surface interpolation	0.01	1.77	90.0
	1	1.78	101.0

さて, 最大濃度方向を推定する手法としては最急降下法がある⁽⁹⁾. この手法は x, y の 2 次元においては, 次式を用いて現在位置 $x^{(n)}, y^{(n)}$ を次の位置 $x^{(n+1)}, y^{(n+1)}$ に更新するものである.

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{d}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}, y^{(n+1)} = y^{(n)} - \frac{d}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \quad (11)$$

ここで, C はポテンシャル場の濃度であり, d は 1 ステップ当りの移動量, $l = \sqrt{(\partial C / \partial x)^2 + (\partial C / \partial y)^2}$ である. この方法は, $x^{(n)}, y^{(n)}$ まわりで 1 次のテイラー展開を行っていることに他ならない. 本論文で提案する 2 次曲面補間法は (7) 式に示す 2 次式で最大濃度方向を近似しており, 現在位置から最大濃度方向 $\phi_{\max}, \psi_{\max}$

へ R だけ移動した地点での2次のテイラー展開と同意である。本手法において $R=0$ とし、1次式で補間を行えば [9] と同一の結果を得る。

5. 結 言

長尺物における荷物と障害物との衝突を考慮しつつ、従来のポテンシャル法を拡張し回転の概念を付加することで、荷物の位置・姿勢を考慮した障害物回避経路計画法を提案した。加えて、拡散方程式に現れる回転抑制係数 $\lambda = (\Delta h / \Delta \theta)^2$; Δh : グリッド幅, $\Delta \theta$: 回転のグリッド幅) を導入することで、荷物の回転を抑制する回避経路が導出できることを明らかにした。さらに、離散的なポテンシャル場から滑らかな経路を得る手法として、2次勾配補間法を拡張した2次曲面補間法を提案した。これらを統合することで、荷物の回転動作を伴うクレーンシステムに、安全で冗長性の少ない搬送経路を導出することができた。

なお、拡散方程式によって得られる経路は必ずしも最短経路ではなく、幅や曲がりという意味での通りやすさまで加味した準最短経路である。これが最短時間搬送につながるかどうかは、最短経路などと比べ経路の曲がりが少ない分、不必要な加減速が抑えられ有利になる場合もあれば、距離が遠くなり不利になる場合もありうる。いかなる条件であっても最短時間搬送を実現する経路の導出のためには、クレーンの速度制約、加速度制約、振れ角制約などを考慮した非線形最適化手法が必要である。

本論文の第2報では天井クレーンの回転機構を有する吊り具の構造、モデル化について述べ、本論文の搬送経路を指令値として用い、最適予見制御系による振動抑制制御、 x, y, θ 軸の同期を考慮した搬送制御について報告する。

6. 付 録

3次元拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C(x, y, \theta)}{\partial t} = D \nabla^2 C = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} \right)$$

サンプリング時間を Δt 、各軸のグリッド幅をそれぞれ $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ として上式の左辺の時間に関する項を前進差分、右辺の空間に関する項を中心差分により差分化すると、

$$\begin{aligned} \frac{C_{t+1,i,j,k} - C_{t,i,j,k}}{\Delta t} = D & \left(\frac{C_{t,i+1,j,k} - 2C_{t,i,j,k} + C_{t,i-1,j,k}}{\Delta x^2} \right. \\ & + \frac{C_{t,i,j+1,k} - 2C_{t,i,j,k} + C_{t,i,j-1,k}}{\Delta y^2} \\ & \left. + \frac{C_{t,i,j,k+1} - 2C_{t,i,j,k} + C_{t,i,j,k-1}}{\Delta \theta^2} \right) \end{aligned}$$

拡散パラメータ r を、

$$r \equiv D \frac{\Delta t}{\Delta h^2} = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = D \frac{\Delta t}{\Delta y^2}$$

と定義し、上式を $C_{t+1,i,j,k}$ について導くと、

$$\begin{aligned} C_{t+1,i,j,k} = & \left\{ 1 - 4r - 2r \left(\frac{\Delta h}{\Delta \theta} \right)^2 \right\} C_{t,i,j,k} \\ & + r \left\{ C_{t,i+1,j,k} + C_{t,i,j+1,k} + \left(\frac{\Delta h}{\Delta \theta} \right)^2 C_{t,i,j,k+1} \right. \\ & \left. + C_{t,i-1,j,k} + C_{t,i,j-1,k} + \left(\frac{\Delta h}{\Delta \theta} \right)^2 C_{t,i,j,k-1} \right\} \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda = (\Delta h / \Delta \theta)^2$ とおけば、

$$\begin{aligned} C_{t+1,i,j,k} = & (1 - 4r - 2r\lambda) C_{t,i,j,k} \\ & + r(C_{t,i+1,j,k} + C_{t,i,j+1,k} + \lambda C_{t,i,j,k+1} \\ & + C_{t,i-1,j,k} + C_{t,i,j-1,k} + \lambda C_{t,i,j,k-1}) \end{aligned}$$

となり、(4) 式が得られる。

文 献

- (1) Schmidt, G. and Azarm, K., Mobile robot path planning and execution based on a diffusion equation strategy, *Advanced Robotics*, Vol.7, No.5, (1993), pp.479-490
- (2) Yang, X. D. et al., Collision-Free Trajectory Planning for Manipulator Using Potential Function, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.60, No.575, (1994), pp.2345-2350
- (3) Jacak, W. et al., A graph-searching approach to trajectory planning of robots, *Robotica*, Vol.10, No.6, (1992), pp.38-47
- (4) Inoue, O. et al., The Collision Avoidance Algorithm of Manipulators Based on Global Subgoals and a Heuristic Graph Search, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.27, No.8, (1991), pp.922-928
- (5) Nearchou, A. C., Path Planning of a Mobile Robot Using Genetic Heuristics, *Robotica*, Vol.16, No.5, (1998), pp.575-588
- (6) Kaneshige, A. et al., Autonomous Mobile Crane System Considering Obstacle Recognition and Optimal Path Planning, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.618, (1998), pp.487-494
- (7) Suzuki, M. and Terashima, K., Three Dimensional Path Planning using Potential Method for Overhead Crane, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.5, (2000), pp.728-736
- (8) Takahashi, R. and Tanamachi, Y., *Calculus of differences* (in Japanese), (1991), pp.68-119, Baifu-kan
- (9) Sato, K., Global Motion Planning Using a Laplacian Potential Field, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.5, (1993), pp.702-709