電力機器設置工事の検討のための経路自動探索法

正員 加藤 二二和 (東京電力)
非会員 野口 高男 (東京電力)
非会員 山藤 哲嗣 (NTTデータ通信)
正員 金田 和文 (広島大)
正員 中前 栄八郎 (広島県立大)

Automatic Route Search Algorithm for Examination of
Electric Power Facilities Installation Work

Fujiwa Kato, Member, Takao Noguchi, Non-member (Tokyo Electric Power Company.), Tetsuji Santo, Non-member (NTT Data Communications Systems Corporation), Kazufumi Kaneda, Member (Hiroshima University), Eihachiro Nakamae, Member (Hiroshima Prefectural University)

A preliminary inquiry on the process of work such as carrying or setting up large-sized equipments for constructing new electric power plants is indispensable for assuring efficient works and safety operations.

We have been developing a computer aided beforehand-study system which assists unexperts who has not much experience about constructions of electric power plants.

In this paper we propose an automatic search algorithm on suitable routes for carrying in electric power facilities; it works as function of the system mentioned above. In the algorithm the automatic route search algorithm for autonomous moving robots and manipulators is improved to fit the construction of electric facilities; the new algorithm can find not only one route but also some candidate routes and take care of the workers' space around the moving equipment.

The proposed algorithm has been applied for examining the process of transformer installation work in a substation.

キーワード：経路自動探索，障害物回避，電力工事のシミュレータ

1. ま え が き

地下変電所などスペース的に制限のある場所に電力機器を搬入する作業において、機器設置手順の事前検討が不十分な場合、変圧器やGISなどの大型機器では途中で搬入するスペースがなくなり、既に搬入した機器をもう一度外へ運び出すなどの不必要な作業を余儀なくされることがある。変圧器などの大型機器は、重量、容積ともに大きく、その移動には多大な労力と時間を必要とし、これらの不手際は作業効率の大幅な低下をまねくものとなる。このようなことを未然に防ぐため、また作業の安全確保面から作業工程の事前検討が非常に重要であるとされている。

これまでの電力工事におけるこれらの事前検討は、図面を見ながら紙面上で検討する方法であり、熟練者でも多くの時間を必要とした。また、作業工程が適切であると判断した後も、作業者にその情報を伝えることがたいへんであ

った。そこで著者らは、電力工事に関して比較的経験の浅い技術者でも容易に作業の事前検討ができ、しかも現場作業員者に対する確かつ具体的に指示できるコンピュータグラフィックスを応用した会話性に優れた電力機器設置工事シミュレーションシステムを開発してきた^{(1)~(4)}。このシステムは変電所などの建屋、搬入機器などを三面図と透視図上にリアルタイムで表示し、マウスを用いて対話形式で作業内容を検討するものである。このシステムを用いて変電所内への変圧器搬入設置作業を検討する方法は、次のとおりである。

(1) 変圧器の各部品を、搬入する単位にグループ分けする。

(2) 作業工程計画書に沿ってグループごとに順次、廊下を通して変圧器室内の設置箇所へと搬入、組立てのシミュレーションをする。その際、システムは移動する変圧器の部品が他のものと衝突しないか、チェックを行う。

ここで、搬入経路に関しては、(i)ユーザが入力した経路に対して通過の可否を判定する、(ii)ユーザが指定した経路の始点・終点に対して通過可能な経路を自動探索する、の2通りの方法がある。後者の経路自動探索は、前者で通過できないと判断されたときにユーザを支援する目的で開発したものである。本論文では、この経路自動探索法について提案する。

経路の自動探索や障害物回避の方法は、ロボットの自律移動やマニピュレータの動作計画を目的として多くの論文が発表されている。Lumelsky は、未知空間において局所的に得られる情報を基に、障害物を避けながら確実に目標点に到達するアルゴリズムを提案し⁽⁵⁾⁽⁶⁾、その後、そのようなアルゴリズムを一般的に設計するための十分条件が見いだされ、登尾が一般的なアルゴリズムを示し⁽⁷⁾、現実の移動ロボットに適用できるパスプランニングアルゴリズムを提案した⁽⁸⁾。

これに対し環境が既知である場合は、移動物体が障害物と干渉しない自由空間を求めてから経路の探索が行える。Lozano-Pérez が移動物体の位置・姿勢を決定するのに必要なパラメータ空間（コンフィギュレーション空間）を定義する方法を提案し⁽⁹⁾、多角形の物体が多角形の障害物を回避しながら回転せずに移動する場合について、ビジビリティグラフを用いてその移動の最短経路を求める方法を示した⁽¹⁰⁾。更に、Lee らは、移動物体が障害物に接するぎりぎりの状態を考慮して移動物体を回転させるアルゴリズムとビジビリティグラフを併用して、移動物体の回転を含んだ経路を求める方法を示した⁽¹¹⁾。近藤らはマニピュレータの障害物回避行動計画を求めるため、迷路法⁽¹²⁾に基づき必要な部分のみのコンフィギュレーション空間を計算し、自由空間を求める汎用的なアルゴリズムで比較的高速に経路探索を行う方法を提案した⁽¹³⁾。

電力機器設置工事シミュレーションの一機能としての経路自動探索法を考える場合、

- (1) 工事現場の設計図面はすべて存在するので既知空間における探索法を適用できる。
- (2) 大型の電力機器の移動では、機器の回転は直線移動に比べ作業量が多く時間も要するので、たとえ最短経路であっても回転の多い経路は不適である。
- (3) 電力機器の移動は、機器の下にコロを敷き、機器の長手方向に進むようにウィンチで引っ張ることにより行うため、移動機器周辺に作業員の作業スペースを必要とする。

などの特徴を考慮する必要がある。

そこで本論文では、(i)既知空間での経路探索、(ii)複数本の経路探索、(iii)作業スペースを考慮した経路探索法を提案する。すなわち、既知空間での経路探索法である迷路法を実空間上で適用し、近藤らの手法を取り入れ部分的に自由空間を計算することにより処理の高速化を図り、作業員の作業スペースを考慮して、複数本の経路を探索できるように改良したものである。なお、最適経路の選択に

は、様々な条件を考慮する必要があるため、本システムでは複数の経路を表示するまでとし、最終決定はユーザの判断にゆだねることとする。そのためユーザが視覚的に検討しやすいよう、探索した経路を移動機器が移動するアニメーションを平面図や透視図で表示する機能をもたせている。また、変電所内の電力機器の移動は床面に沿うものが主なので、移動経路を二次元上に限定している。

以下、提案する経路自動探索法的前提条件と処理手順を説明し、適用例をあげてその有用性を示す。

2. 経路自動探索法

〈2・1〉 経路探索における前提条件 電力工事の特性に合わせ経路探索を行うための前提条件を以下に示す。

(1) 探索する経路は二次元平面上とする 変電所構内での大型機器の動きは主に床面移動であるので、探索する経路は二次元平面上とする。

(2) 衝突チェックを三次元空間で実施する 衝突チェックは三次元の物体どうしについて行い、平行移動に対しては包絡体生成法を、回転に対してはサンプリング法を用いる（付録1参照）。

(3) 複数本の経路を探索する 重量のある大型機器の移動では、最短経路が最適経路であるとは限らず、方向転換の回数や周囲の作業環境を総合的に考慮し判断する必要がある。本システムでは複数本の経路を探索可能であり、それらの結果を画面に表示し、その中からユーザが総合的な判断により選択することができる。

(4) 作業員の作業スペースを考慮する。

(5) 移動機器の移動方向は、長手方向とする 電力機器の移動は、機器の下にコロを敷きウィンチで引っ張ることにより行うので、作業の安全面から、機器の移動方向は長手方向とされている。

〈2・2〉 経路自動探索の処理手順 全体のコンフィギュレーション空間を求めてから、迷路法により経路を求めるのでは、あらかじめすべての自由空間（障害物の存在しない空間）を算出することとなり、効率が悪いことから、近藤らは迷路法を用い経路探索に必要な部分のみのコンフィギュレーション空間を計算し自由空間を順次算出するアルゴリズムを開発した⁽¹³⁾。すなわち、経路探索には無関係な自由空間を求める処理をなくすことで効率を上げる方法である。

著考らの求める経路は、三次元物体を二次元の $X-Y$ 平面に沿って移動させるものなので、コンフィギュレーション空間は $X-X$ 方向の移動と移動機器の回転 θ の三次元となる。そこで、三次元実空間から三次元のコンフィギュレーション空間への変換も計算量が多くなることを考慮し、コンフィギュレーション空間への変換を行わない方法、すなわち実空間上で迷路法を適用し移動機器の大きさを考慮しながら経路探索を行う方法を提案する。

提案する経路自動探索の処理は、(i)三次元空間で始点と終点から波状にメッシュを発生させることにより、(ii)

通過可能性のある経路を複数本探索し、(iii)その経路に対して実際に移動機器を移動させることにより通過可能であるかをチェックする。また、その際に経路の単純化も行う。各処理手順について、以下に説明する。

(1) メッシュの発生およびその高速化 提案手法における通過可能性のある経路の探索は、三次元実空間上における迷路法に基づいている。処理方法を以下に示す。

(i) メッシュエレメントの大きさの決定 図1に示すように、移動物体を包含するバウンディングボックス(B_x, B_y, B_z)の X - Y 平面の短い辺を一辺とする正方形と、 B_z を高さにもつ直方体をメッシュエレメント(以下、エレメントと呼び、エレメントの集合をメッシュと呼ぶ)の大きさとする。ただし、実際に機器を移動する際、現場作業員の作業スペースを必要とするので、バウンディングボックスの大きさにあらかじめ設定した作業スペース幅を加えたものをエレメントの大きさとする。

(ii) 始点側・終点側のメッシュ発生中心の決定

移動物体の初期の移動方向と移動経路の終点における姿勢を考慮するため、始点側・終点側のメッシュ発生中心を移動経路の始点・終点と異なる点とする。すなわち、図2に示すように、始点側のメッシュ発生中心は移動経路の始点より初期移動方向に B_x だけ進んだ点を、また、終点側のメッシュ発生中心は移動経路の終点よりも最終姿勢から

図1 メッシュエレメントの大きさ
Fig. 1. The size of mesh element.

図2 メッシュ発生中心
Fig. 2. Center of mesh generation.

図3 メッシュの発生
Fig. 3. Mesh generation.

求まる進入方向に B_x だけ戻った点とする。

(iii) エレメントの発生 エレメント発生は始点と終点からそれぞれの点を中心とし、 X - Y 平面上を波状にメッシュを同時に発生させる。各エレメントは、発生された波の発生順の番号(以下、波番号と呼ぶ)と、周囲8方向のエレメント番号を記憶している。波番号 n のエレメントは波番号 $n-1$ の各エレメントの周囲8方向に発生される。ただし、既にエレメントの存在する領域や他の物体の存在する領域には、新たなエレメントは発生させない。これにより、メッシュは波が二次元空間中を伝搬するように発生される。図3(a)に波番号3までのエレメントが発生された例を示す。

(iv) メッシュ発生終了条件 始点および終点から発生したエレメントが衝突した時点で、メッシュの発生を終了する[図3(b)]。また、始点および終点側のどちらか一方でも波番号 n に対するエレメントが一つも発生されなかった場合もメッシュ発生を終了し、移動経路が存在しないことを表示する。

上述したように、メッシュ発生時において、既にエレメントが存在する領域や他の物体が存在する領域には、新たなエレメントを発生させないアルゴリズムとなっている。このことを実現するためには、新たに発生させようとするエレメントとすべての物体および既存のエレメントとの干渉チェックを行う必要がある。この際のメッシュ発生処理を高速に行うため、次の二つの方法で発生させるエレメント数を抑制する。

(i) エレメント発生領域の指定 大域的な検討空間をユーザが平面図で会話的に指定する。例えば、ある室内での機器の移動を考える場合、室外を経路探索の検討空間とする必要はないので、室内を含む領域を経路探索の検討空間として指定する。これにより、メッシュの発生を室内

空間に限定する。

(ii) エlement膨張制御 始点付近では障害物が少なく、終点付近に障害物が多い場合、Elementの発生は障害物を選んで行われるため、終点側でのメッシュはなかなか広がらないのに対し、始点側のメッシュは大きく広がる。ところが、経路を探索するうえで特に情報が要求されるのは障害物が多く存在する空間であり、障害物があまり存在しない空間において波が大きく広がることは、 unnecessary処理を行うこととなり、好ましくない。そこで、 unnecessaryElementの発生を抑えるため、近藤らが提案した高速化処理（波面の膨張の制御による効率化）⁽¹³⁾を採用した。すなわち、始点あるいは終点から広がったElementの数を比較し、どちらかが極端に少なければ、少ないほうのみを広げ、両者の総数がほぼ同等となるようにする。具体的に著者は、始点あるいは終点側のElementの数が他方の1/2以下であれば、4/3以上になるまでメッシュを広げ、そうでなければ両方のメッシュを広げるアルゴリズムとした。4/3以上とした理由は、障害物の多く存在する空間に優先的にメッシュを発生させるためである。

(2) 通過可能性のある複数本の経路探索 図4に示すように、衝突したElementからそれぞれのメッシュの中心に向けて波番号の小さいElementを順次トレースする。更に、Element発生の始点と移動経路の始点、およびElement発生の終点と移動経路の終点をそれぞれ結ぶことにより、一つの経路が探索される。電力工事の場合、これによって直ちに経路を決定することは作業性を考慮す

ると考えしも最良策とはいえないことがある。そこで、他の通過可能性のある経路の探索を可能とするため、(1)項の処理の拡張を考えた。以下にこのことについて述べる。

(i) メッシュの通過指定領域の作成 メッシュを発生する過程で同じ波番号のメッシュが障害物により分断されることがある。この場合、分断された領域ごとに通過指定領域を作成する。ここで、上下左右の4方向隣のうち、一方しか同じ波番号のElementが隣接しない場合、そのElementを端点Elementと呼ぶ。図5(a)はある始点からのメッシュ発生状況を示したものであり、波番号3が、障害物により分断されている。この場合の端点Elementを(b)図に示す。通過指定領域の作成方法は、次のとおりである。

(a) 現在発生中の波番号をもつメッシュにおいて端点Elementを探す[(b)図]。

(b) 端点Elementから、それに隣接する同じ波番号のElementを順次検索し、次の条件のどちらかを満たすまでのElementを一つの通過指定領域とする。

- ① 他の端点Elementが現れる[(c)図]。
- ② 角に位置するElementが二つ現れる[(d), (e)図]。この条件は、通過可能経路をできるだけ多く探索するためにある。

なお、通過指定領域を構成するElementの中には、複数のそれに共有されるElementが生じる。

(ii) 経路探索検討空間の作成 作成した通過指定領域を組み合わせることにより、経路探索を行う空間を限定

図4 経路の探索
Fig. 4. Route search.

図5 通過指定領域の作成
Fig. 5. Generation of passing areas.

図 6 経路探索検討空間
Fig.6. Examination space for route search.

図 7 経路探索検討空間の拡張
Fig.7. Expansion of examination space.

する。すなわち，図 6(a)において始点側では波番号 2，終点側では波番号 3 のメッシュが障害物で分断される。そこで，(i)項により通過指定領域を作成し，この領域を中

心として，始点（終点）および始点側と終点側のメッシュが衝突したエレメントに到達するまで，異なる波番号のエレメントに隣接するエレメントを順次探し出す。このよう

にしてできた空間を、経路探索検討空間と呼ぶ。(b)図に通過指定領域(始点側:2箇所,終点側:3箇所)を、図(c)~(h)にそれらを組み合わせて作成した経路探索検討空間の例を示す。

(iii) 経路探索検討空間における経路の探索 作成された経路探索検討空間において、図4で示したように衝突したエレメントからそれぞれのメッシュ中心に向けて波番号の小さいエレメントを順次トレースすることにより、1本の経路が探索できる。このことをすべての経路探索検討空間で行い複数本の経路を探索する。ただし、図6(e),(f),(h)の場合、経路探索検討空間においては始点側と終点側のエレメントが衝突していないため、経路が存在しないとして、経路の探索は行わない。

以上により、複数の経路探索が可能であるが、(e),(f),(h)図のように経路が存在しないとされた場合からも図7(a)のような経路を探索できる可能性がある。そこで、始点側と終点側のメッシュを更に発生させてから上記(i)~(iii)の処理を行う。すなわち、図6(f)の通過指定領域の組合せの場合、図7(b)に示すように波番号5のメッシュを発生させることにより連結した経路探索検討空間を得ることができる。このことを繰り返し、波番号7のメッシュまで発生させると図6(e),(h)に対応した図7(c),(d)の経路探索検討空間が作成でき、更に多くの

経路が探索可能となる。なおこれにより、あらかじめ探索したい最大の経路数を指定することとし、メッシュ発生を終了条件を、次のどれかを満足したときとする。

- ① 始点側のメッシュが終点に到達したとき。
- ② 終点側のメッシュが始点に到達したとき。
- ③ 指定した本数の経路が見つかったとき。

(3) 通過可能性のチェック これまでに探索された経路は、機器が通過できる可能性はあるが、その保証はない。そこで、探索された通過可能性のある経路について、実際に衝突チェックを行いながら物体を移動させる必要がある。このとき、(4)項で述べる移動経路の単純化を併せて行う。

移動の方法には平行移動と回転の2種類があり、その衝突チェックは付録1に示した方法で行う。また、回転の際の回転半径は、以下の手順で決定する(図8参照)。なお、作業上制限される最大回転半径、最小回転半径、微小変化分 δr は、あらかじめデータで与えるものとする。また、回転の際には移動物体を包含するバウンディングボックスの中心が円周上を通過するとする。

- (i) r を最大回転半径とする。
- (ii) 経路に内接する半径 r の円の中心を回転中心とする。
- (iii) サンプル法により衝突チェックを行う。
- (iv) 衝突がなければ r を回転半径として処理を終わる。衝突した場合は、 $r=r-\delta r$ とし、 r が最小回転半径に至るまで、(ii)~(iv)の手順を繰り返す。
- (v) 最小回転半径となっても回転不能の場合、この経路は通過不可能とする。

(4) 移動経路の単純化 (2)項で求めた通過可能な経路は、エレメントをトレースすることにより求めているので、 unnecessaryな回転と平行移動が含まれる。これを可能な限り削除した経路とする方法を以下に示す。

- (i) 始点側のメッシュ発生中心を点 P_s とする。
- (ii) 終点側のメッシュ発生中心を点 P_e とする。

図8 回転半径の決定
Fig. 8. Decision of rotation radius.

▲: 移動経路の始点 +: 移動経路の終点 ■: 障害物 ▨: 通過指定領域
×: 障害物と干渉 □: 通過指定領域の代表点を通らない ○: 単純化可能

図9 経路の単純化
Fig. 9. Simplification of route.

図 10 経路自動探索例
Fig. 10. Example of automatic route search.

(iii) 点 P_s と P_e を結んだ線を仮の経路とし、移動機器が通過可能かのチェックをする。通過可能であれば、これを新しい経路として経路の単純化の処理を終わる。ただし、仮の経路が通過できたとしても、通過指定領域を代表する点を通らない経路となるときは新しい経路とせず、次の処理(iv)を行う。

(iv) 通過不能の場合は、点 P_e を一つ始点寄りの点にずらす。

(v) 処理(iii)～(iv)を繰り返す。ただし、点 P_s と P_e が隣り合ったときは、点 P_s を一つ終点寄りの点にずらし、次の処理(vi)を行う。

(vi) 処理(ii)～(v)を繰り返す。ただし、点 P_s と終点側のメッシュ発生中心が隣り合ったときには、経路の単純化ができないとして処理を終わる。

図9(a)は、経路探索で求めた単純化前の経路を示している。(b)図は、点 P_s が始点側のメッシュ発生中心のときの単純化の処理を示しており、すべての仮の経路において単純化ができなかった例である。(c)図は、点 P_s を始点側のメッシュ発生中心の次の点に移したときの単純化の処理を示しており、2番目の仮の経路で単純化できた例である。そして(d)図は単純化後の経路を示している。

3. 適用例

提案した経路自動探索法を変電所構内で機器を移動する場合に適用した。ここでは、変圧器の部品を変圧器の右側に移動するときの例で示す。

(i) 図10(a)は移動前の機器配置状態を示しており、赤色で移動機器を示している。

(ii) メッシュを発生させる領域をマウスにより方形領域(赤線)で指定する[(b)図]。

(iii) (c)図の赤い十字と青線で示すように、移動経路を入力する。ここで、移動経路は、第1点を始点、第2点を進行方向を示すための点、第3点を終点として入力する。

(iv) メッシュが発生される。始点側を青色、終点側を緑色で表示している。(d)図は波番号6までのメッシュの発生状況を示している。このとき、初めて始点側と終点側のメッシュが交わっている。

(v) (e), (f)図に示すように、探索された通過可能性のある経路に対して経路の単純化を行いながら、実際に機器を移動させ衝突チェックを行う。

(vi) 探索された経路の表示を(g), (h)図に示す。赤く示された軌跡が平行移動部分、その他の色が回転部分を示す。なお、回転部分の色の違いは、回転位置を明確にするためのもので、1,2,3,...回目の回転に対し、緑、青、黄、水、紫色が繰り返されて表示される。また、回転中心を回転軌跡付近に赤色の点で示している。この場合、8本の経路を探索した。ユーザは、平面図や透視図上で機器がリアルタイムで移動するアニメーション機能を用いて各経路について移動状況を観察し、総合的な判断により最適経路を

選択することができる。この図の場合、ユーザは(g)図の右上よりも移動距離は長くなるが、最も回転が少なく、経路が単純、かつ作業スペースが広くとれる(h)図の左下を最適経路として選択するであろう。

4. あとがき

本論文では、電力工事における電力機器搬入経路を自動的に検索する方法を提案した。この方法では、電力工事の性格上最短経路が最適経路とならないことがあるため、複数本の経路探索が行えるものであり、最適経路の選択はユーザの総合的判断に任ずるものとなっている。また、移動機器の周囲には作業に必要なスペースを考慮して経路探索を行う方法である。

今後の課題としては、次のようなことが考えられる。

(1) 移動可能な空間と機器の大きさの差が小さくなると、メッシュ発生初期位置(経路の始点と終点)により、その空間を通過するメッシュが発生できず、通過不可能と判断されることがある。

(2) 通過指定領域を必ず通過する経路としているため、人間の目から見ると単純化が足りない不自然な経路が探索される。

(3) 移動の途中でスイッチバックを行わないと曲がれない経路がある場合にも、自動で経路探索が行えること。

(平成5年4月26日受付)

文 献

- (1) 福田・中前・藤井・西田・野口・大橋:「電力工法CADシステムの開発」, 昭63電気関係学会中国支部連大, 215
- (2) 野口・大橋・富岡・平沢・中前:「電力設備建設工法検討へのコンピュータグラフィックスの応用について」, 電気学会電力技術研資, PE-88-19~36, 21 (昭63)
- (3) 金田・山藤・中前・西田・野口・大橋:「グラフィックスワークステーションを用いた電力工法CADシステムの開発」, 情報処理学会第39回(平元後期)全大, 2187
- (4) 金田・山藤・中前・野口・大橋:「自動経路探索機能をもった電力工法CADシステムの開発」, 平2通信学会秋季全大, 6-167
- (5) V.L. Lumelsky: "Algorithmic and Complexity Issues of Robot Motion in an Uncertain Environment", *J. Complexity*, 3, 146 (1987)
- (6) V.L. Lumelsky & A.A. Stepanov: "Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automation Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape", *Algorithmica*, 2, 403 (1987)
- (7) H. Noborio: "A Path-Planning Algorithm for Generation on Intuitively Reasonable Path in an Uncertain 2D Workspace", Proc. 1990 JAPAN-USA Symposium on Flexible Automation, 477
- (8) 登尾・橋目:「可視領域をもつ移動ロボットの未知空間における実際のパスプランニングアルゴリズム」, ロボット学誌, 10, No.3, 378 (平4)
- (9) T. Lozano-Pérez: "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movement", *IEEE Trans. SMC*, 11, No.10, 681 (1981)
- (10) T. Lozano-Pérez & M.A. Wesley: "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles", *Commun. ACM*, 22, No.10, 560 (1979)
- (11) C.T. Lee & Phillip C.-Y. Sheu: "A Divide-and Conquer Approach with Heuristics of Motion Planning for a Cartesian Manipulator", *IEEE Trans. SMC*, 22, No.5, 929 (1992)
- (12) C.Y. Lee: "An Algorithm for Path Connections and its Applications", *IRE Trans. Electric Computer*, EC-10, 346 (1961)

- (13) 近藤・木村：「迷路法に基づく自由空間算出法を用いた衝突回避動作計画」，ロボット学誌，5，No. 4，263（昭62）
(14) 川辺：3次元シミュレーション技術，工業調査会

付 録

1. 衝突チェックの方法

衝突チェックは，平行移動時は包絡体生成法で，回転時はサンプリング法を用いて行う⁽¹⁴⁾。

- (1) 包絡体生成法 移動物体が通過する空間を一つ

付図 1 包絡体生成法

app. Fig. 1. Method of using an envelope volume.

付図 2 サンプリング法

app. Fig. 2. Sampling method.

の包絡体として生成し，この包絡体と他の物体との干渉チェックを行うことにより衝突チェックを行う。この方法は，移動物体を通過空間を考慮した静止物体（包絡体）に置き換え，干渉チェックを行うため衝突を見逃すことがない。包絡体の生成方法を以下に示す。

(i) 移動物体のすべての面の外向き法線ベクトルと移動ベクトルとの内積をとる。法線ベクトル，移動ベクトルともに単位ベクトルである〔付図 1(a)〕。

(ii) 内積が負である面を始点位置に残し，内積が正である面を終点の位置に平行移動する〔付図 1(b)〕。

(iii) 始点位置の面群と，終点位置の面群の輪郭線をそれぞれ抽出する〔付図 1(c)〕。

(iv) 二つの輪郭線に対辺とする面を作成する。ただし，作成される面の法線ベクトルと移動ベクトルとは垂直でなければならない〔付図 1(d)〕。

(v) 二つの抽出した面と新たに作成した面を組み合わせることにより，包絡体を作成できる〔付図 1(e)〕。

(2) サンプリング法 十分小さい時間間隔 δt ごとに，移動物体の位置，姿勢をサンプルして他の物体との干渉チェックを行うことにより，衝突チェックを行う（付図 2 参照）。なお，本システムでは，衝突時間を考慮する必要がないので，サンプリング法によるサンプリング間隔を微小時間間隔の代わりに微小回転角とし，衝突を見逃すことがないように十分小さな角度とする。

加 藤 二 和（正員） 1964 年 12 月 22 日生。1989 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年 4 月東京電力(株)入社。現在，同社システム研究所 AI 研究室に勤務。主として，電力分野へのコンピュータグラフィックス技術応用システムの研究開発に従事。情報処理学会会員。

野 口 高 男（非会員） 1955 年 12 月 21 日生。1980 年 3 月埼玉大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年 4 月東京電力(株)入社。現在，同社システム研究所 AI 研究室に勤務。主として，電力分野へのコンピュータグラフィックス技術応用システムの研究開発に従事。

山 藤 哲 嗣（非会員） 1966 年 6 月 27 日生。1991 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年 4 月 NTT データ通信(株)入社。現在，同社社会システム開発センタに勤務。主として，マルチメディアシステム開発に従事。情報処理学会会員。

金 田 和 文 (正員) 1959 年 10 月 1 日生。1984 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年 4 月中国電力(株)勤務。1986 年 2 月広島大学工学部第二類(電気系)助手、現在に至る。この間、1991 年 5 月より 1 年間アメリカ・ブリガムヤング大学へ出張。主として、コンピュータグラフィックス、画像処理の研究開発に従事。工学博士。情報処理学会、電子情報通信学会会員。

中 前 栄八郎 (正員) 1929 年 4 月 11 日生。1956 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年広島大学工学部助手、1961 年同講師、1964 年同助教授、1968 年同教授。現在、広島県立大学経営学部教授。この間、1973 年より 1 年間アメリカ・クラークソン工科大学へ出張。主として、電気機器の電界・磁界解析、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。工学博士。IEEE、ACM、情報処理学会、電子情報通信学会、テレビジョン学会、照明学会、日本シミュレーション学会会員。