

2003年度 卒業論文

# ジャンプする物体の経路プランニング

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3D アプリケーション構築プロジェクト

学籍番号 99P355

原川 和泰

2003年度 卒業論文概要

論文題目

ジャンプする物体の経路プランニング

メディア学部

学籍番号：99P355

氏名

原川 和泰

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

経路探索, A\*, 弾道計算, 幅優先探索アルゴリズム

近年、リアルタイム3DCG技術の発展に伴い、インタラクティブコンテンツにおいてもリアルタイム3DCG技術を用いたものが増えている。3DCG技術を用いたコンテンツの中にはユーザーが動かすオブジェクトや、自動的に動き回るオブジェクトがジャンプをしながら高低のある複雑な形状の地形を移動するものがある。このようなコンテンツを作成する際、地形上のある地点から別の地点までオブジェクトが到達できる経路の存在の有無を確認できるような手段があれば有用である。

本研究ではジャンプを行うオブジェクトの経路プランニング手法について研究した。具体的には従来の地形を連続的に移動する場合の経路プランニング法に、ジャンプによって移動する場合を組み合わせた手法を提案する。

# 目次

第1章	研究の背景と目的	1
第2章	空間探索グラフの作成	4
2.1	オブジェクトが地平にそって平行移動する場合 . . . . .	5
2.2	オブジェクトが落下して移動する場合 . . . . .	6
2.3	オブジェクトがジャンプして移動する場合 . . . . .	6
第3章	探索アルゴリズムを用いた経路プランニング	13
3.1	幅優先探索アルゴリズム . . . . .	13
3.2	セルのグループ化 . . . . .	16
3.3	セルのグループ化を利用した経路探索の手順 . . . . .	19
第4章	評価	21
第5章	おわりに	28
	謝辞	30
	参考文献	31

# 第 1 章

## 研究の背景と目的

近年、リアルタイム 3DCG 技術の発展に伴い、インタラクティブコンテンツにおいてもリアルタイム 3DCG 技術を用いたものが増えてきている。とくにコンピュータゲームはそのような傾向が顕著な分野であるといえる。リアルタイム 3DCG 技術を用いたコンテンツの中にはユーザーが動かすオブジェクトや、自動的に動き回るオブジェクトがジャンプをしながら高低のある複雑な形状の地形を移動するものがある。代表的な例として 1996 年に発売された任天堂のスーパーマリオ 64[1] が挙げられる。このようなジャンプで移動するオブジェクトが存在する複雑な地形を舞台とするコンテンツを作成する際、地形上のある地点から別の地点までオブジェクトが到達できる経路が存在するか、また逆に制作者が意図しない経路などが存在しないかという事を確認するのは手間がかかる作業である。このような作業を軽減するために、オブジェクトがマップ上である地点からある地点までにあたらないように辿りつくための移動経路を自動的に発見することができれば有用である。これまでも障害物を回避しながら地形上のある位置から別の位置まで移動する経路を探ることができる経路プランニングに関する研究はあった [2][3][4][5][6]。3次元空間を対象とした経路プランニングに関する研究もある [7][8][9][10]。しかし、ジャンプして移動することのできるオブジェクトのための経路プランニングに関する研究は行われていない。従来の経路プランニングは地形を連続的に移動する経路を探索するものが多く、ジャンプのようにある地形から別の離れた地形へ移動す

るためのものではなかった。

そこで、本研究では、段差がある3次元空間のマップ上において、ジャンプで移動できるオブジェクトがある地点から目的地まで移動する経路プランニングの手法を確立することを目標とする。具体的には、まずオブジェクトの移動の最小単位を基準に探索対象の空間をメッシュ分割する。メッシュによって分割された空間の最小単位をセルとする。次に、あるセルの内部から別のセルへ移動できるかどうかの関係からグラフを作成し、そのグラフから探索アルゴリズムを用いて経路を探し出す。従来の経路プランニングでは、オブジェクトはある分割されたセルから隣接する別のセルに移動するのみであったが、今回はオブジェクトがジャンプで隣接しないセルまで移動する場合を考慮してグラフを作成した。また本研究を行うに際し、問題の条件を次のように限定した。オブジェクトの大きさは考慮せず、オブジェクトは空間上の点として表現した。オブジェクトは落下、ジャンプ、地平にそった平行移動の三種類の移動ができることとし、オブジェクトのジャンプは、任意の仰角からの一定の初速度を持った放物運動とし、空気抵抗は考慮しない。マップは全て正方形のメッシュで区切られたものとし、マップ上の高低は全て水平な段差に限定した。また、図1.1のように空中に浮いている障害物や、せり出しのある地形も除外した。

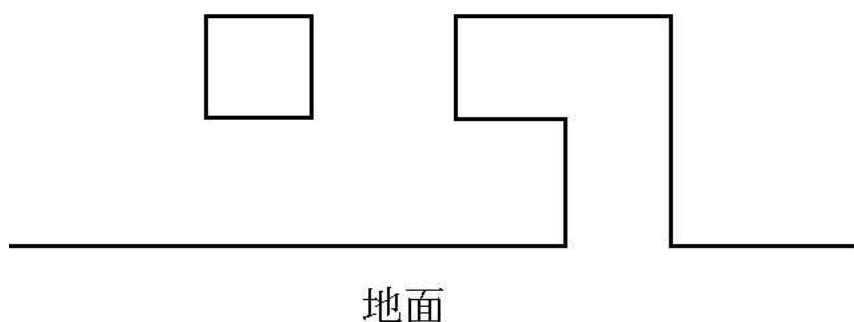


図 1.1: 空中に浮いている障害物や、せり出しのある地形

本論文は本章を含め全 5 章で構成されている。第 2 章では空間から経路探索のための空間探索グラフを作る手順を述べ、第 3 章では空間探索グラフから経路を探索するための手順を具体的に述べる。第 4 章では実際に本論文で述べた経路プログラミングでさまざまな地形で経路を探索し、評価を行う。最後に第 5 章にて研究全体の総括を述べる。

## 第 2 章

# 空間探索グラフの作成

経路プランニング法については様々な研究があるが、今回の研究では一般的なグラフ理論を利用した方法 [2][4] を応用した。本章ではオブジェクトの移動の仕方と、それを基にした空間探索グラフを作成する手法について述べる。

グラフ理論とはコンピュータネットワークなどの分野でも応用されている数学の一分野である。グラフ理論では点の集合とそれをつなぐ線の集合で構成されたものをグラフと呼び、点は節点や頂点、線は辺や枝などと呼ばれる。経路プランニング問題においては、経路を探索したい対象の空間を可視マップやメッシュ分割といった方法を用いてグラフに抽象化し、その中のグラフとして経路を導く手法をよく用いる。

既存の経路プランニング法では、まず対象空間をオブジェクトがその内部を自由に動きまわれるセルを単位としてメッシュ分割する。そしてセル、もしくは内部の点を頂点とし、オブジェクトが分割されたある空間の内部から別の空間へ移動できるかどうかの関係を辺として空間探索グラフを作成する。本研究ではオブジェクトが自由に動ける空間を正方形のセルにメッシュ分割する。さらにセルを頂点とし、あるセルからオブジェクトが別のセルへ直接移動できる場合、セル同士の間を有向成分をもった辺で連結する。そして空間上の全てのセル同士の関係を調べて空間を網羅する空間探索グラフを作成する。以下に空間探索グラフを作成する手順について述べる。

まず空間探索グラフに空間上のすべてのセルを頂点として加える。そしてセルごとにそのセル内からオブジェクトが直接移動できるセルを辺で連結していく。本研究で扱うオブジェクトは以下の三種類の方法で移動ができる。

- 地平にそった平行移動
- 落下
- ジャンプ

オブジェクトの移動の仕方により移動可能なセルは変わる。以下に移動方法ごとに空間探索グラフに追加する辺について述べる。

## 2.1 オブジェクトが地平にそって平行移動する場合

メッシュ分割でできたセルにおいて頂点を共有するセルを隣接するセルと呼ぶとする。オブジェクトは並行移動で隣接するセルの方向へ移動する。図 2.1 にオブジェクトが平行移動によって移動できる 8 方向を示す。

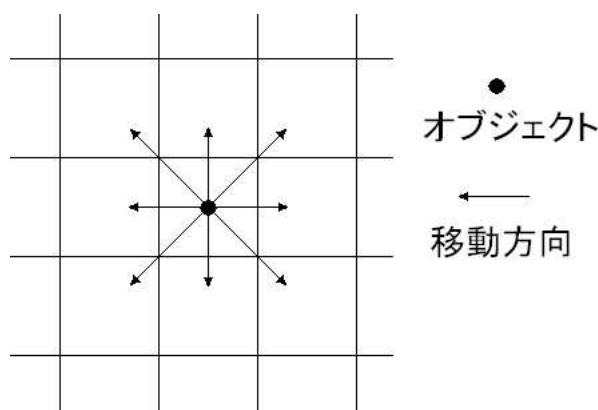


図 2.1: オブジェクトが平行移動する方向

この図 2.1 のようにオブジェクトが移動できる場合、空間探索グラフに中央のセルから隣接する 8 つのセルの間に矢印の方向の有向辺を追加する。



## 2.2 オブジェクトが落下して移動する場合

オブジェクトが存在しているセルに隣接したセルが、現在オブジェクトがいるセルよりも低いセルの場合は、オブジェクトは落下することによって移動することができる。落下して移動する場合もオブジェクトがいるセルと落下して移動するセルとの間に有向辺を追加する。

## 2.3 オブジェクトがジャンプして移動する場合

オブジェクトが存在しているセルから、図 2.2 のようにジャンプをすることによって、オブジェクトがいるセルより離れたセルや、高いところにあるセルへ移動することができる。

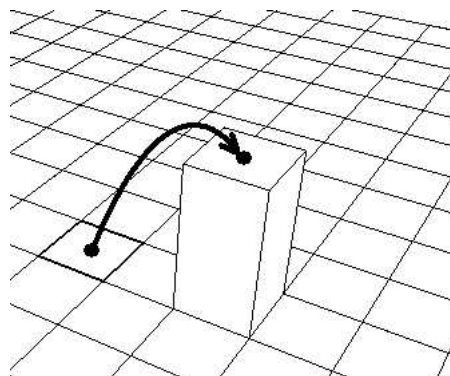


図 2.2: ジャンプで移動できるセル

以下にマップ上のセル  $O$  の内部にオブジェクトがあると仮定したとき、空間上の他のセル  $S$  へオブジェクトがジャンプによって移動できるかどうかを判定する方法を述べる。まずセル  $O$  からジャンプして移動できる空間上の座標の範囲について述べる。一方、セル  $O$  とセル  $S$  以外のセルの影響によってセル  $O$  からセル  $S$  へのジャンプができなくなる場合が考えられる。例えばセル  $O$  からセル  $S$  へのジャンプの軌道を遮るようなセルが存在する場合である。ここではまずセル  $O$  からジャンプして移動できる空間上の座標の範囲について述べ、その後障害物の影響を考

慮してセルOからセルSまで移動できるかどうかを判定する方法について述べる。

まず対象空間が三次元空間であること、セルOが正方形のセルであることなどを考慮せずに、オブジェクトが高さを  $y$  とする 2次元の  $x - y$  空間上の原点からジャンプすると仮定して、そこからからジャンプで到達できる位置の範囲について述べる。

オブジェクトがジャンプを始める位置を原点  $O$  として、 $v$  をジャンプする時の初速度、 $\theta$  をジャンプする時の仰角、 $g$  を重力加速度、オブジェクトが原点からジャンプしてから経った時間を  $t$  とする。 $t$  におけるオブジェクトの座標を  $(x, y)$  とすると、

$$x = vt \cos \theta \quad (2.1)$$

$$y = vt \sin \theta - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2.2)$$

である。

式 (2.2) を変形して

$$y + \frac{1}{2}gt^2 = vt \sin \theta \quad (2.3)$$

式 (2.1) と式 (2.3) をそれぞれ二乗して和を求めると、

$$x^2 + (y + \frac{1}{2}gt^2)^2 = (vt)^2(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \quad (2.4)$$

$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$  より

$$x^2 + (y + \frac{1}{2}gt^2)^2 = (vt)^2 \quad (2.5)$$

この式 (2.5) を展開して  $t$  についてまとめると

$$\frac{1}{4}g^2t^4 + (gy - v^2)t^2 + x^2 + y^2 = 0 \quad (2.6)$$

この式(2.6)を $t^2$ についての二次方程式と見るとその実根条件が、すなわち原点0から $x, y$ までジャンプできるかどうかの条件である。

判別式は

$$D = -2gv^2y - g^2x^2 + v^4 \geq 0 \quad (2.7)$$

となり、これを $y$ についてまとめると

$$y \leq -\frac{g}{2v^2}x^2 + \frac{v^2}{2g} \quad (2.8)$$

となる。

式(2.8)の条件を満たす座標 $(x, y)$ は、原点を中心とした凸放物線の内部になり、原点から初速度 $v$ でジャンプした時に到達できる座標である。図2.3でこの範囲を示す。

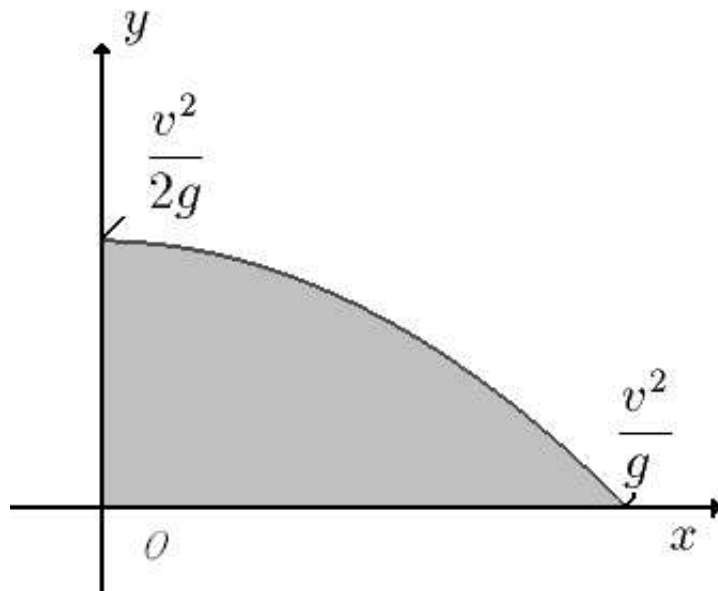


図 2.3: 方物線の内部が実根条件

図 2.3中のグレーで塗られた部分が原点  $O$  からオブジェクトがジャンプしたとした場合、オブジェクトが移動可能な範囲である。

実際に求めなければならないのは 3 次元空間上の正方形のセル  $O$  内部からの移動範囲であるので移動可能な範囲は正方形の底をもつ伏せたおわん型の放物面の内部となる。この内部にセル  $S$  が一部分でも入っていれば、セル  $O$  からセル  $S$  へは移動できるということである。図 2.4はセル  $O$  内部からの射程範囲を俯瞰した図である。

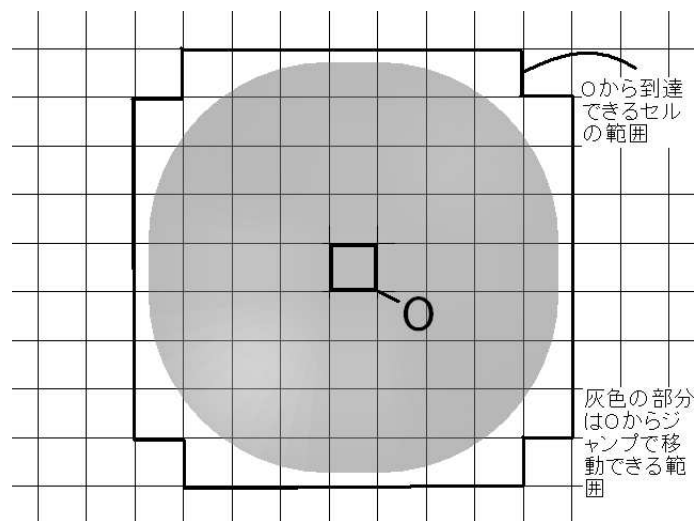


図 2.4: セル  $O$  内部からの射程範囲

中央の太枠で囲まれたセルがセル  $O$  である。図 3.2 中の太線の内部にセル  $S$  がある場合、セル  $O$  からセル  $S$  へは移動できる。

また、セル  $O$  からセル  $S$  の間にあるセルがセル  $O$  からセル  $S$  へのジャンプに対する障害物となる場合がある。そのようなセルがある場合について述べる。

まず、どのようなセルがセル  $O$  とセル  $S$  の障害物になる可能性があるかについて述べる。セル  $O$  からのジャンプで移動可能な範囲にセル  $S$  があるとすると、セル  $O$  の内部のどこかからセル  $S$  の内部のどこかへジャンプで移動するとした場合、そのジャンプの軌道を遮る可能性があるセルは、セル  $S$  とセル  $A$  の頂点同士を結び合っている図形の内部にあるセルである。図 2.5は障害物になる可能性があるセ

ルの範囲を太枠で示した図である。

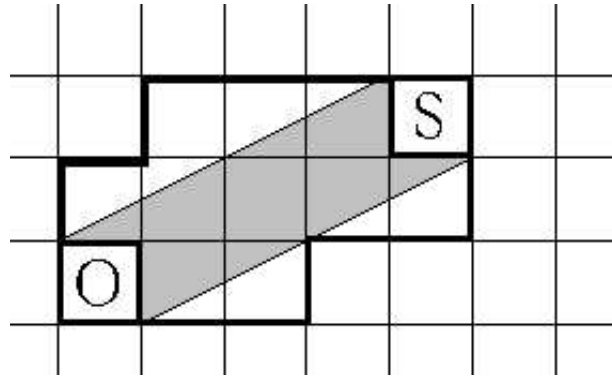


図 2.5: 太枠で囲まれたセルが障害物となる可能性のあるセル

障害物になるセルを高さによって二つの種類に分ける。セルOからのジャンプでは移動できないセルと、移動できるセルの二つである。

セルOからジャンプで移動できない障害物とは高すぎてセルOからジャンプして移動可能な範囲に入らないセルのことである。

セルOからのジャンプでは移動できない障害物がある場合はセルOの内部から見て、その障害物によって見えなくなる部分へはジャンプで移動することはできない。セルOからジャンプでは移動できない障害物に隠されてセルSが見えなくなってしまう場合は、セルOからセルSへはジャンプで移動できない。図2.6にその様子の例を示す。

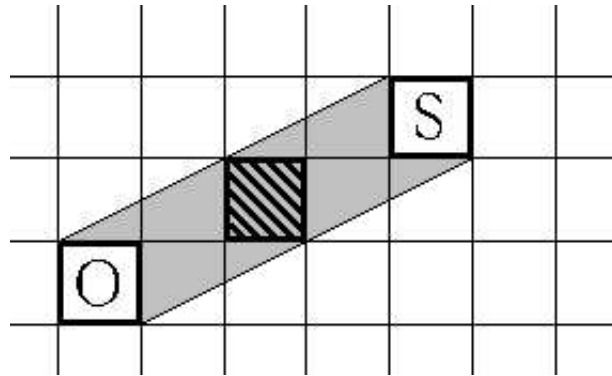


図 2.6: セル O からセル S へのジャンプを斜線が引かれたセルが遮る

また、飛び越えられるセルが障害物になっている場合でもセル O からセル S へジャンプで直接到達できなくなる場合がある。障害物によってセル S までの距離を飛ぶことのできるジャンプが遮られてしまう場合である。図 2.7 にその例を示す。

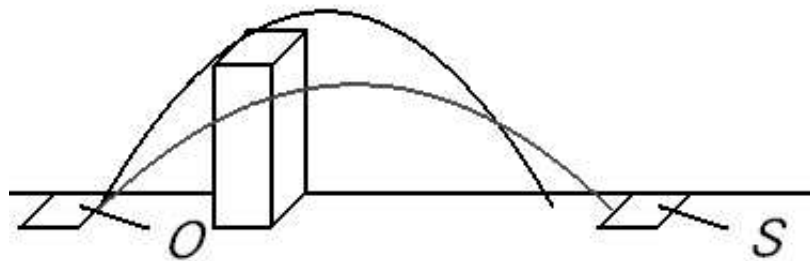


図 2.7: 障害物がジャンプできる距離を縮めてしまう場合

しかし、セル O から飛び越えられるセルとはジャンプで移動できるセルのことであり、一旦、障害物のセルに移動してからセル S へジャンプすることでセル O からセル S へは必ず移動することができる。図 2.8 にその例を示す。

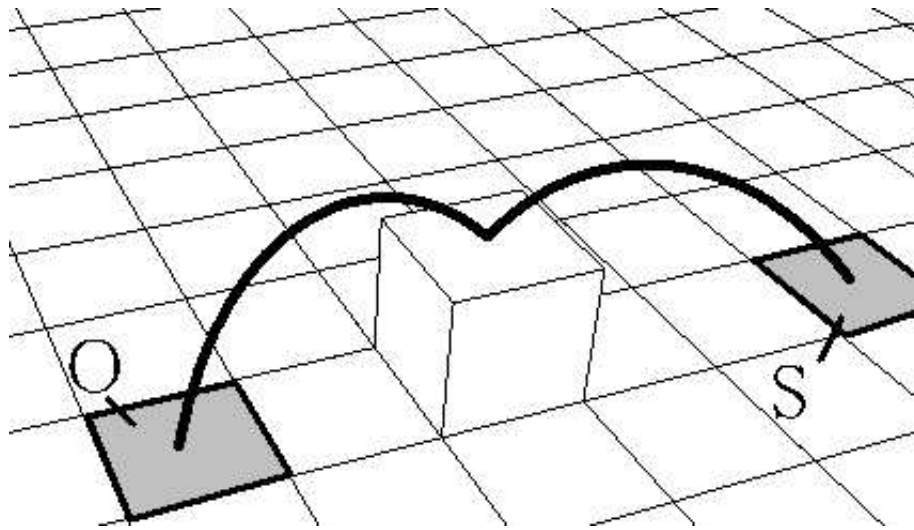


図 2.8: 間にある障害物を中継してセルOからセルSまでジャンプする

よってジャンプで移動できる障害物によってセルOからセルSまでジャンプで移動する経路が遮られている場合も、ジャンプで移動できない障害物の場合と同様に、障害物を飛び越えてセルOからセルSへジャンプで移動できる可能性は考慮せず、セルOからセルSまでは直接ジャンプで移動できないとする。

ここまででのべたジャンプで移動可能な範囲と障害物に対する対処法を用いることにより、セルOからセルSまでジャンプすることができるかどうか確認することができる。セルOからセルSまでジャンプできる場合は、セルOからセルSの間を連結する有向辺を空間探索グラフに加える。ところでセルOとセルSが隣接した場所にあつて、セルOとセルSの高さが同じ、またはセルSが低い場合は、平行移動や落下でもセルSへ移動できる場合がある。セルOからセルSへ移動する方法を平行移動で行う場合とジャンプで移動する場合の両方を探索グラフに辺として追加すると空間探索グラフに同じ向きで頂点を結ぶ有向辺が二つできることになる。このような経路の重複を回避するため平行移動や落下で移動できるセルへはジャンプで移動する辺は空間探索グラフに追加しないということにする。

## 第 3 章

# 探索アルゴリズムを用いた経路プランニング

本章では、経路探索アルゴリズムを用いて空間探索グラフから経路を求める手順について述べる。まず幅優先アルゴリズムについて述べ、その後、セルのグループ分けを利用して空間探索グラフを作成するメリットと方法について述べ、最後に本研究におけるグラフ作成から経路探索までの手順について述べる。

### 3.1 幅優先探索アルゴリズム

ジャンプで到達できる高さには限界があるのに対し、落下して移動できる高さには限界がない。よって落下してあるセルの内部からあるセルへは移動できるが、その逆へはジャンプでは直接移動できない一方通行の場合がある。図 3.1はその一例である。この図の地形をセル 4 からセル 3 までの高さであるならジャンプできるが、セル 6 からセル 2 までの高さはジャンプできないオブジェクトが動き回るとする。セル 2 はセル 3 の 2 倍、セル 1 はセル 3 の三倍の高さである。



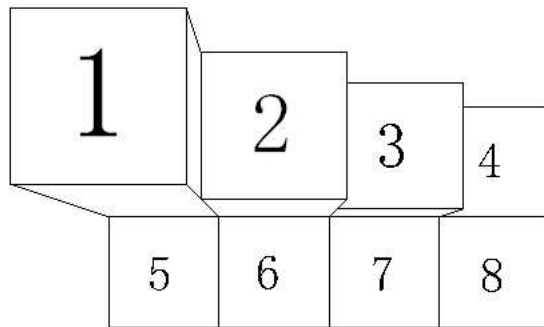


図 3.1: 対象空間となる地形

この場合オブジェクトは1から5へは落下して移動できるが5から1へはジャンプで直接移動することはできない。図 3.1の空間をオブジェクトが動く時、セルを頂点として、セルの内部から内部へオブジェクトが移動できる関係を辺とした空間探索グラフが図 3.2である。

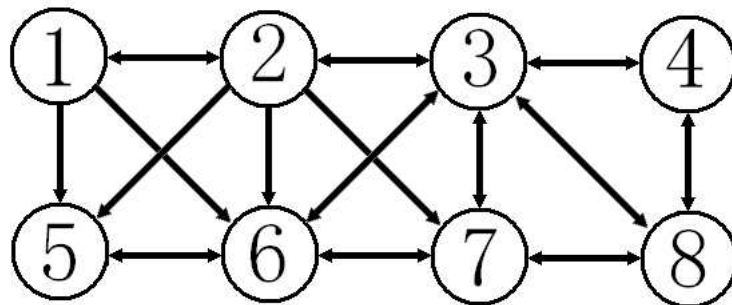


図 3.2: 図 3.1のセル同士の移動可能の関係をグラフ化した図

図 3.2の円部分が頂点、矢印が辺である。図 3.1中のセルの番号と同じ番号のついている図 3.2の頂点が対応するセルと頂点である。辺の矢印はそれが引いている

方向にのみ移動できることを表しており、1 から 6 へは移動できないが、6 から 1 へは移動することができる。

あるセルを出発点とし別のセルを目的地とする経路を導くためには、出発点のセルと対応するグラフの頂点から目的地のセルと対応する空間探索グラフの頂点への経路を求める。例えば図 3.1 のセル 1 からセル 6 への経路を求めるためには図 3.2 のグラフの 1 から 6 までの経路を求めればよい。確実にこの経路をグラフから求めるアルゴリズムとして、幅優先探索アルゴリズムを利用する。この探索アルゴリズムの特徴を挙げると、

- 経路が存在する限り見つけ出す。
- もっとも頂点の少ない経路を見つけ出す事ができる。
- 有向グラフにおいては、求められる経路は必ずしも逆に辿れることは保証されない。

である。

具体的に幅優先探索アルゴリズムの動作について述べる。幅優先探索アルゴリズムは出発地点から同じ辺の数で到達できる節点を探索し、目的地までの経路を探すアルゴリズムである。例として図 3.2 の頂点 6 から頂点 1 への経路を求める手順を述べる。

- まず頂点 6 から辺一つの距離にある頂点を探索する。頂点 1 と頂点 6、頂点 2 と頂点 6 は辺でつながっているが、いずれも頂点 6 からは頂点 1、頂点 2 へ移動はできない。頂点 6 から辺一つで移動できるのは頂点 5、頂点 3、頂点 7 である。
- 続いて、頂点 6 から辺を二つ経由することで移動できる頂点を探索する。それらはすなわち頂点 5、頂点 3、頂点 7 からそれぞれ辺一つで移動できる頂点である。しかし、頂点 7 から頂点 8、頂点 3 へ移動できるが、頂点 3 は辺一つの節点なので新たに探索する必要はない。辺二つの距離にある頂点は頂点 2、

頂点 8, 頂点 4 ということになる。以下同様の処理を目的地となる節点を探索するまで繰り返す。

- 頂点 6 から辺三つの距離にある頂点を探索する。頂点 2 から移動できる辺三つの距離にある頂点の中に頂点 1 があり探索は終了する。頂点 1 へ至るのに経由した頂点と辺が幅優先探索アルゴリズムで得られる頂点 6 から頂点 1 までの経路である。

## 3.2 セルのグループ化

この項では、経路探索に掛かる計算時間を抑えるために、セルをグループ化して空間探索グラフの作成に利用する方法について述べる。またグループを使った経路の有無の判定について述べる。

本研究ではオブジェクトは平行移動と落下においては隣接するセルにしか直接移動できないとした。空間探索グラフの辺も平行移動と落下による辺は隣接するセル同士にしか連結しない。離れたセルへ平行移動のみで到達する経路は空間探索グラフ上では必ず隣接したセル間の移動の連続として表現される。よって、オブジェクトが平行移動と落下だけで移動する場合、経路探索グラフにおいて一つのセルに接続する辺の数は最高でも 8 本である。しかし、オブジェクトがジャンプする場合は、離れたセル同士をつなぐ辺も空間探索グラフに追加する。よって一つのセルに接続する辺の数は大幅に増加し、空間探索グラフ全体の複雑さも比例して増加する。幅優先探索アルゴリズムでは探索するグラフが複雑化するほど計算に時間が掛かるので経路探索に大きな負担を掛けることになる。また一方で、あるセルからジャンプで移動できるセルを探索する作業自体も計算コストの大きな作業である。これらを軽減する方法として最も効果があるのは空間上のセルのうちジャンプによる移動に関係するセルを限定することである。それにより、空間探索グラフの複雑化も抑えることができ、ジャンプで移動できる場所を探索する回数も減らすことができる。また、探索アルゴリズムで最も時間が掛かるのは

経路の存在が無い場合である。このような場合を直接経路探索を行わずとも判定できれば計算時間の短縮に大いに役に立つ。セルのグループ分けをすることでこれらの問題に利用することができる。

グループ分けの手順について述べる。まず、隣接している同じ高さの平行移動で移動できるセル同士を集めたグループ分けを行う。図 3.3 にその例を示した。

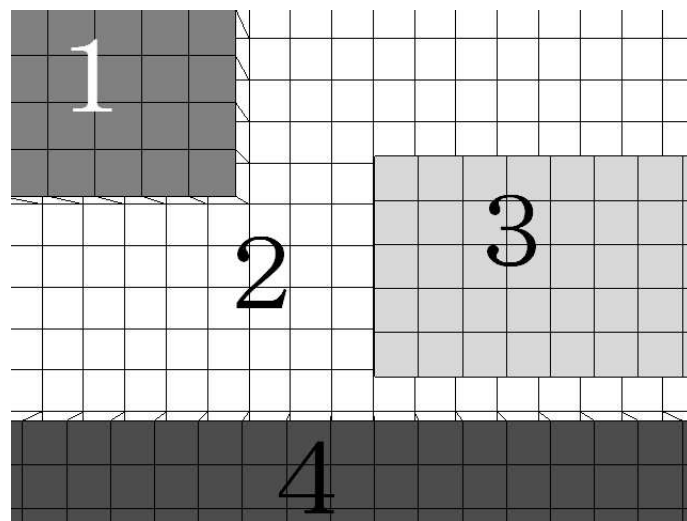
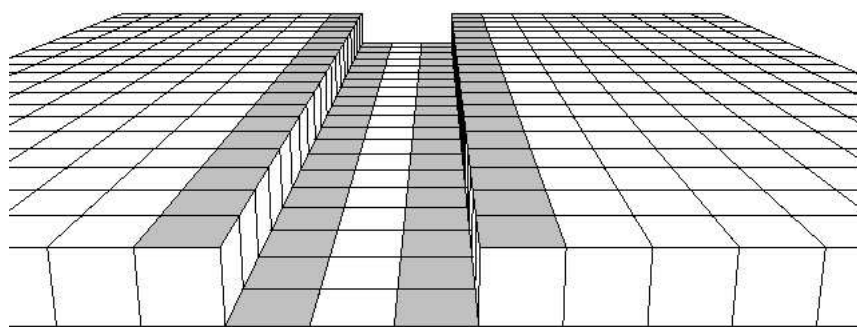


図 3.3: グループ分けされたセル

具体的には以下のようにしてジャンプを行う必要があるセルの組み合わせを限定する。同じグループに属するセル同士の間ならばジャンプで移動せずとも往来できる。空間探索グラフにおいてこのようなセル同士の間をあえてジャンプで移動する辺で連結しなくとも、そのセル同士の間経路が失われることはない。よってまず空間探索グラフを作成するに当たって、同じグループにあるセル同士ではジャンプで移動する場合を考慮しないとする。こうすることで空間探索グラフを大幅に単純化することができる。また、あるグループの内部のあるセルから別のグループの内部のあるセルへ移動できる場合は、あるグループの内部の任意のセルから別のグループの内部の任意のセルへかならず移動できる。つまり、あるグループ内の全てのセルと別のグループ内の全てのセルの間をジャンプで移動できる可能性を判定して空間探索グラフを作成する必要はない。またグループの中で

最も遠くのグループにまでジャンプで到達できる可能性があるのは、他のグループと隣接したセル群である。さらに、他のグループからのジャンプが到達できる可能性があるのも他のグループと隣接したセル群である。よって空間探索グラフを作成するにあたり、オブジェクトがジャンプによる移動に関わる可能性のあるセルを各グループ内の他のグループと隣接したセル群だけに限定することによって空間探索グラフの複雑化を抑えることができる。図 3.4 にそのセル群を示す。



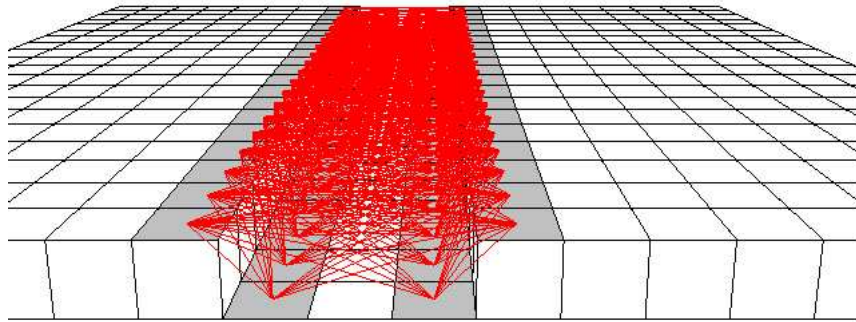
■ 他のグループと隣接したセル

図 3.4: 他のグループと隣接したセル群

これらより、グループ化を利用して空間探索グラフに追加されるジャンプによる辺は以下のように限定する。

- あるグループ内部の他のグループと隣接しているセルと別のグループ内部の他のグループと隣接しているセルを連結する辺

図 3.4の地形で空間探索グラフのジャンプによる辺を図 3.5で示す。



— ジャンプによる辺

図 3.5: ジャンプによる辺

便宜上、今後グループ内部の他のグループと隣接しているセルをグループのジャンプセルと呼ぶことにする。

### 3.3 セルのグループ化を利用した経路探索の手順

以下にセルのグループ化を利用した経路探索を行う手順について述べる。

- 空間探索グラフにセルを頂点として追加する。
- オブジェクトが平行移動する場合の辺を空間探索グラフに追加する。隣接している同じ高さの平行移動で移動できるセル同士をあつめてグループ分けを行う。
- 違うグループのジャンプセル同士でオブジェクトがジャンプもしくは落下での移動する場合の辺を空間探索グラフに追加する。
- グループの違うジャンプセル同士の間にかかれたジャンプや落下による辺を調べることでグループ同士の接続関係を割り出す。グループを頂点とし、グループ間の接続関係を辺としてグラフにする。
- 幅優先探索アルゴリズムを用いて、出発点となるセルのあるグループと目的

地となるセルのあるグループの経路の存在の有無をしらべる。もし経路が無ければ出発点と目的地のセルの間にも経路は存在しないので探索は終了する。

- グループごとの経路探索で経路が存在することが確認された場合、ジャンプの辺を違うグループのジャンプセル同士に限定した空間探索グラフから幅優先探索アルゴリズムを用いて経路を探索する。

## 第 4 章

### 評価

本章では、これまでに述べた経路プログラミング手法を実装し、実際にどのような経路探索が行われるかを評価する。また、幅優先アルゴリズムを用いて経路の有無の判定する際に掛かる時間をグループ単位で探索した場合と直接経路を探索した場合の比較を行った。

20 × 20 のセルのマップに、5 段階で設定された高さの違うセルをさまざまに配置し、出発点と目的地となるセルを決め、その間を移動する経路を本論分で述べた経路プログラミング法を用いて探索し、セルをどのように経由する経路ができるかを観察した。

以下に図の見方について述べる。図中の START と示された太枠のセルが出発点であり、END と示された太枠が目的地である。経路は線分と灰色に塗ったセルで示した。オブジェクトは線分の引かれた順序に沿って灰色に塗られたセルを移動する。赤い線分は往路、青い線分は復路を示し、線分の細い部分は平行移動、太い部分は落下もしくはジャンプで移動する部分であることを示す。また幅優先アルゴリズムを用いて経路の有無の判定する際の幅優先アルゴリズムのステップ数をグループ単位で探索した場合と直接探索した場合を比較して表に載せた。



- 階段状の地形

表 4.1: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	4230	6
復路	4304	6

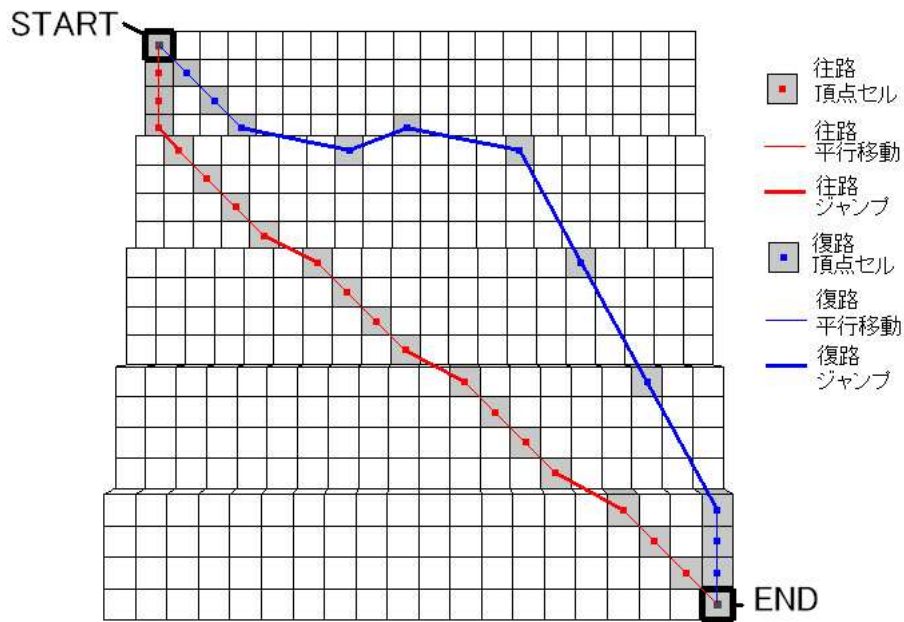


図 4.1: 階段状の地形における経路

階段上の地形になっている地形で図中の START と示された太枠で囲まれたセルから、END と示された太枠で囲まれたセルに移動する経路を探索した。段を一つずつ上がって目的地へ到達している。往路が低いところからのジャンプなのに対し、復路は高いところからのジャンプなのでグループの反対の端までジャンプが届くため、往路と復路で平行移動する量が変っている。図 4.1はその模様である。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表 4.1はその結果である。

- 溝のある地形

表 4.2: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	3861	1
復路	3861	1

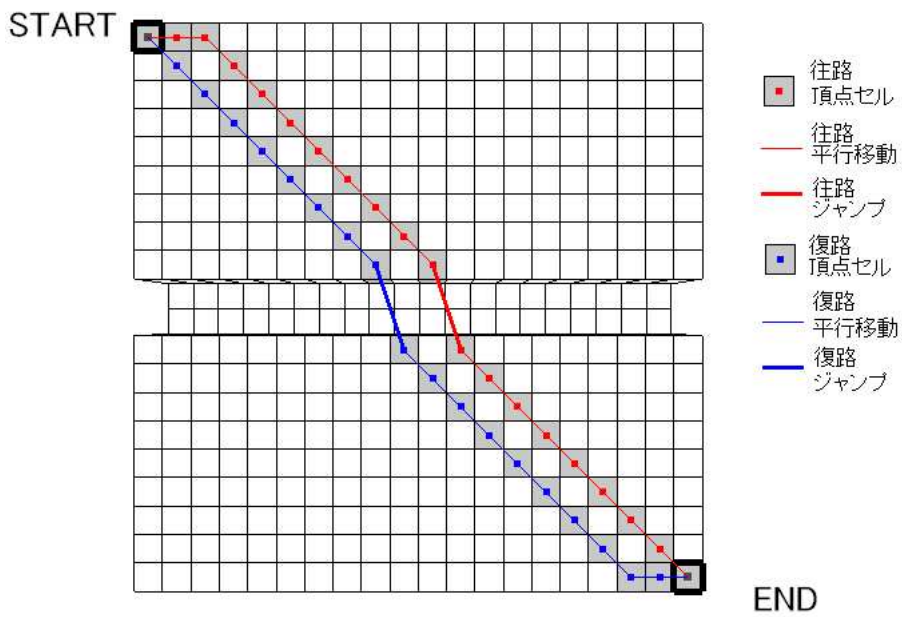


図 4.2: 溝のある地形における経路

溝のある地形で START と示された太枠で囲まれたセルから、END と示された太枠で囲まれたセルに移動する経路を探索した。溝を飛び越えて目的地へ到達する様子が観察された。図 4.2はその模様である。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表 4.2はその結果である。

- 段差にそった出発点と目的地

表 4.3: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	1305	1
復路	1409	1

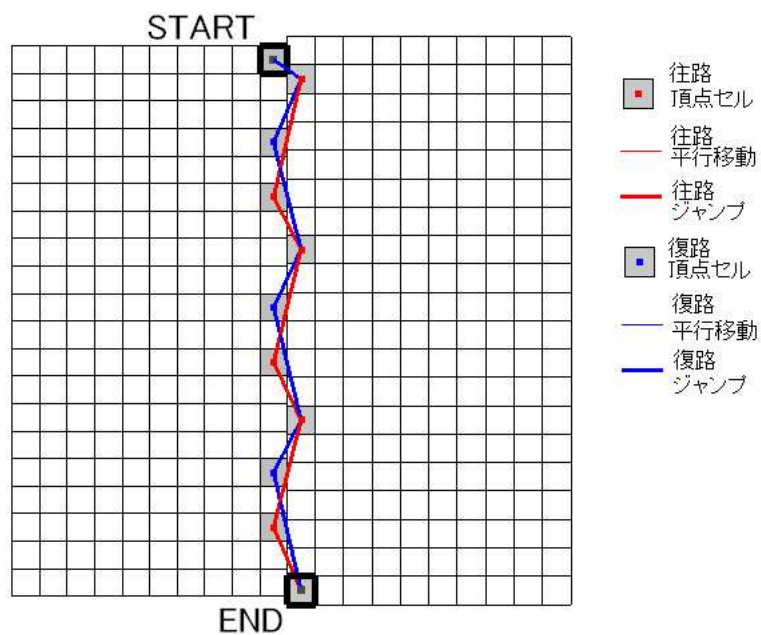


図 4.3: 段差にそった経路

START と示された太枠で囲まれたセルから、END と示された太枠で囲まれたセルに移動する経路を探索した。溝にそって歩いて移動せずに、違う段差のセルを交互にジャンプしながら移動する様子が観察された。図 4.3はその模様である。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表 4.3はその結果である。

- ジャンプで到達不可能な地形

表 4.4: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	2954	1
復路	1433	2

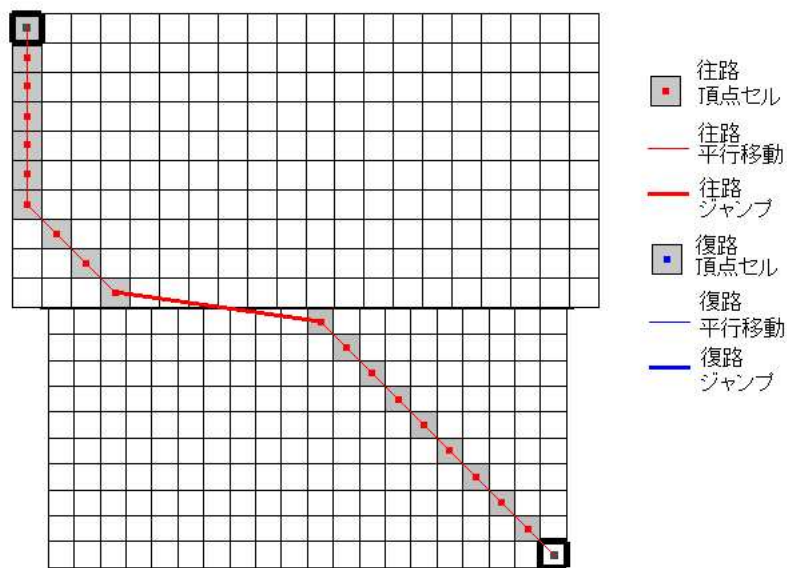


図 4.4: 出発点から目的地まで到達不可能な地形

START と示された太枠で囲まれたセルから、END と示された太枠で囲まれたセルまで移動する経路を探索した。START のセルはオブジェクトのジャンプ能力では到達不可能な高さにある。往路では START から GOAL まで到達できる経路が探索されたが、復路は到達できる経路が探索されなかった。図 4.4はその模様である。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表 4.4はその結果である。

- ランダムに配置された複雑な地形

表 4.5: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	7505	3362
復路	7420	3320

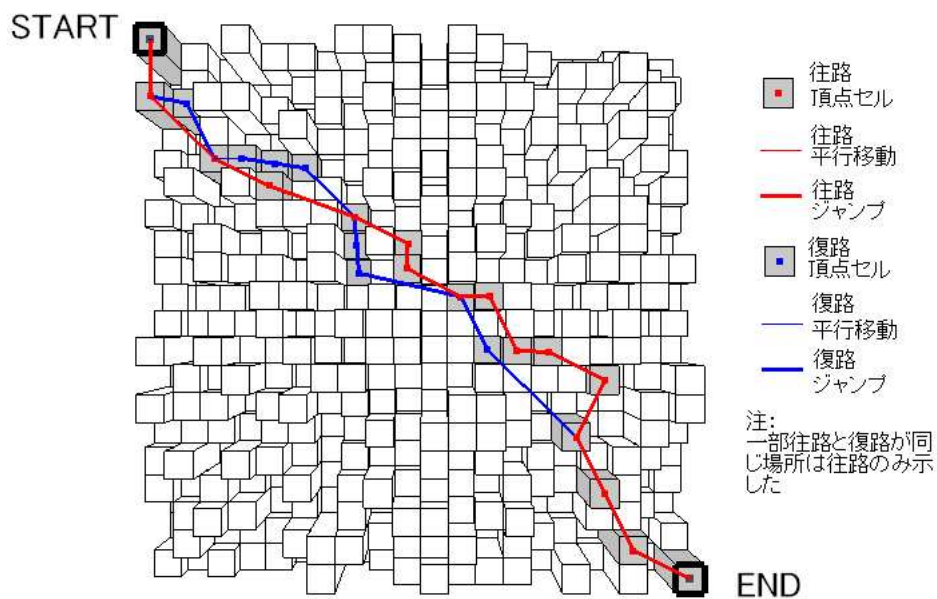


図 4.5: ランダムに配置された複雑な地形

5段階の高さのセルをランダムに配置した地形でSTARTと示された太枠で囲まれたセルから、ENDと示された太枠で囲まれたセルに移動する経路を探索した。グループ化されているセルが少ないためグループ化による効果あまりみられず、経路も平行移動せずにはほぼジャンプのみで移動する様子が観察された。図4.5はその模様である。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表4.5はその結果である。

- 意図した経路よりも最短距離がある地形

表 4.6: 経路有無の判定にかかったステップ数

	グループ化なし	グループ化あり
往路	2786	37
復路	2858	37

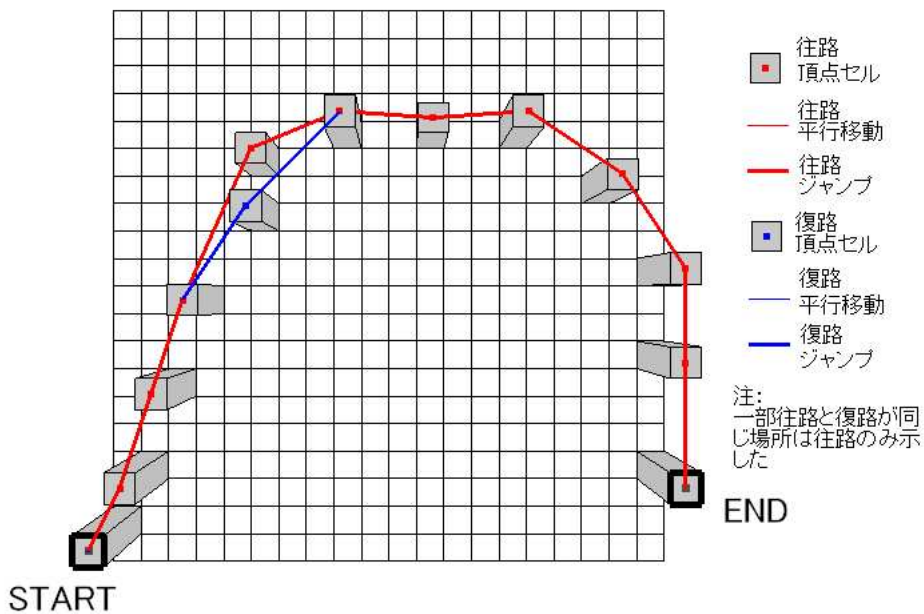


図 4.6: 点々と突起した地形がある地形

START と示された太枠で囲まれたセルから、END と示された太枠で囲まれたセルまで、点々と突起した地形を配置した。地形上の突起した部分を全て経由せずに到達できる経路の有無を探索した。図 4.6はその模様である。全ての突起した部分を経由しない経路が発見された。また、グループ単位で探索した場合と直接探索した場合で経路の有無の判定にかかるアルゴリズムのステップ数を比較した。表 4.6はその結果である。

# 第 5 章

## おわりに

本論文では、ジャンプを行うオブジェクトの経路プランニングに着目し、それが 3D コンテンツ制作において制作した地形の解析などに有用だと考えて研究した。

本研究では従来の二次元空間のメッシュ分割を用いてグラフ化する方法を応用し、オブジェクトがジャンプする場合の移動可能範囲を地面に沿ってしか移動できないオブジェクトに追加してグラフ化を行い実現した。

本論文の経路プランニング手法を実装したプログラムで、階段状のマップや、溝のあるマップ、規則性のない複雑なマップで経路を探索したところそれぞれ経路を得ることができた。しかし、段差の側を移動する場合は、むやみにジャンプで移動する経路が目立ってしまった。また、セルをグループ化して経路の有無を判定する方法は、単純なマップでは劇的な探索時間の短縮を達成できたが、グループの数が実際の空間のセルとあまりかわらない複雑な地形ではあまり効果は得られなかった。

今後の課題としては、セルの分割法やアルゴリズムなどの最適化によって単に出発地点から目的地までの経路が存在するかどうかを探すだけでなく、たとえばあまりジャンプしない経路や、逆になるべく大きなジャンプをする経路などを見つけ出せるようにするなど、意味をもたせた経路を自動的に探しだすことなどが考えられる。また、本研究では条件から除外した進入できない部分がある地形や、せり出しのある地形や傾きのある地形においてもパスプランニングが行えるよ

うにすることや、リアルタイムに経路探索を行えるようにするなどといったことが考えられる。



# 謝辞

本研究にあたり終始暖かいご指導をしてくださった担当教官の渡辺大地先生、副査の和田篤先生に心より感謝の意を表します。

また、研究について数々の助言や協力をしてくださった渡辺研究室のみなさんに厚くお礼申し上げます。

最後にこれまで温かく見守ってくださった家族と深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 任天堂, スーパーマリオ 64 ,  
[http://www.nintendo.co.jp/n01/n64/software/nus\\_p\\_nsmj/](http://www.nintendo.co.jp/n01/n64/software/nus_p_nsmj/).
- [2] Bryan Stout, "パスプランニングのための A\*の基礎", Game Programming Gems ,  
株式会社ボーンデジタル, 2001.
- [3] Hart, P., Nilsson, N., and Raphael, B., " A formal basis for the heuristic  
determination of minimum cost paths ",IEEE Trans.Syst.Sci.,Cybern,Vol. ssc-  
4, No. 2,JULY, pp. 100-107, 1968.
- [4] 奥村佳雄, " 空間分割による経路探索 ", <http://izariuo.s12.xrea.com/developing/findpath/>.
- [5] Lozano-Perez, T. and Wesley, M., " An algorithm for planning collision-free  
paths among polyhedral obstacles ", Comm. ACM, Vol. 22, pp. 560-570, 1979.
- [6] 森江修也, " 集団移動シミュレーションにおける移動障害物の回避に関する研  
究 ", 東京工科大学学士卒業論文,2002.
- [7] Lydia E. Kavraki, Petr Svestka, Jean-Claude Latombe, Mark H. Overmars,  
" Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration  
Spaces ", IEEE Trans on Robotics and Automation,12(4),456-580 1996.
- [8] Mark Foskey, Maxim Garber Ming C.Lin, Dinesh Manocha, " A Voronoi-Based  
Hybrid Motion Planner ", <http://www.cs.unc.edu/~geom/voronoi/vplan/>.

- [9] Edward Moore, “ The shortest path through a maze ”, International Symposium on the Theory of Switching, Harvard University Press,1959.
- [10] 大草むつみ, “ 遺伝的アルゴリズム (GA) を利用した魚モデルの経路制御の最適化 ”, 東京工科大学学士卒業論文,2002.