制約付き Delaunay 三角形分割を利用したエージェント配置モデル

秋山 英久　　野田 五十樹

独立行政法人 産業技術総合研究所 情報技術研究部門

1. はじめに

連続空間におけるマルチエージェントやマルチロボットの問題では，各エージェントやロボットの空間的な位置がそのパフォーマンスに重大な影響を及ぼす．特に，サッカーのようにチーム内での協調的な振る舞いを要求されるゲームでは，各エージェントの役割配分と配置を戦略的に決定しなければならない．

エージェントを戦略的に配置する問題に対して，エージェントが移動すべき位置を素早く獲得させるためには，人間の直感に基づく訓練データを利用した教師あり学習が効果的である．しかし，すべての状態に対して訓練データを用意することは困難であるため，与えられた有限のサンプルから出力値を求める何らかの関数近似が必要となる．さらに，戦略の修正に伴って訓練データも繰り返し修正されうるため，得られた関数の入出力関係は人間にとって理解しやすいことが望ましい．本稿では，これらの要求に対応するために，制約付き Delaunay 三角形分割を利用した関数表現モデルを提案する．

2. 従来研究

サッカーのようなボールゲームにおいてはボールが最も重要な注目対象であり，その位置座標値を重要な状態変数とする考えは自然である．RoboCup サッカーシミュレーションにおいては，ボール位置座標を入力，エージェントの移動位置座標を出力とする関数近似としてエージェント配置をモデル化する手法がよく用いられている．そのような手法のひとつとして，三角形分割を利用した関数表現モデル[1]が提案されている．

このモデルでは，Delaunay 三角形分割と線形補間を組み合わせることで，人間の直観的操作で作成された少数の訓練データから，適切な入出力関係を持つ関数を高速に導出可能としている．さらに，二次元平面上の三角形分割は容易に視覚化可能であるため，ある訓練データが影響を及ぼす範囲を人間が把握することも容易となっている．

しかしながら，このモデルには訓練データ間の位相関係を固定できないため，冗長な訓練データを要求される場合がある．本稿では，制約付き Delaunay 三角形分割を導入した拡張モデルを提案し，この問題を解決する．

3. 三角形分割を利用した関数表現モデル

三角形分割を利用した従来の関数表現モデルでは，Delaunay 三角形分割とグローシェーディングアルゴリズムを用いている．三角形の各頂点は訓練データを表しており，頂点の座標値は訓練データの入力値そのものである．各頂点が持つ出力値から，未知の入力値に対する出力値が補間される．このモデルでは，与えられた訓練データは誤差を含まず，すべて正しいと仮定する．

Delaunay 三角形分割[2]とは，ボロノイ図と双対な関係にあるグラフ構造で，"平面上の点集合Pの三角形分割Tを構成した場合に，Tに含まれる三角形の外接円がその内部にPの点を含まない"という特徴をもつ(図 1)．

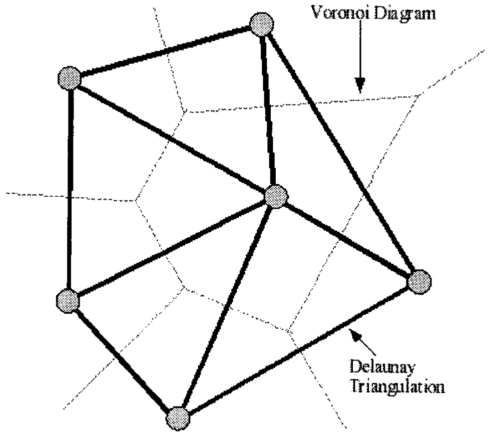

図 1 Delaunay 三角形分割

グローシェーディングアルゴリズムは単純な 3 点の内挿法である．図 2 において，三角形の頂点 P_a, P_b, P_c から得られる出力をそれぞれ $O(P_a), O(P_b), O(P_c)$とすると，三角形の内部に含ま

Agent Arrangement Model using Constrained Delaunay Triangulation
Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda
AIST, Information Technology Research Institute

れる点Bにおける出力O(B)は以下の手順で求められる．

1. P_aとBを通る直線と線分P_bP_cとの交点Iを求める．
2. $|\overrightarrow{P_bI}| = m_1$，$|\overrightarrow{P_cI}| = n_1$とすると，Iにおける出力値O(I)は，
$$O(I) = O(P_b) + (O(P_c) - O(P_b))\frac{m_1}{m_1 + n_1}$$
3. $|\overrightarrow{P_aB}| = m_2$，$|\overrightarrow{BI}| = n_2$とすると
$$O(B) = O(P_a) + (O(I) - O(P_a))\frac{m_2}{m_2 + n_2}$$

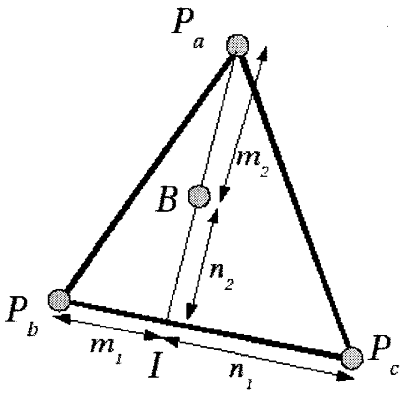

図 2 グローシェーディングアルゴリズムによる線形補間

以上のモデルを用いることで，三角形分割を構成する凸包内部の入力値に対して連続な関数が保障される．しかしながら，既存の Delaunay 三角形分割に対して頂点を追加，削除すると，辺の追加，削除の操作が発生するため，周辺に存在する頂点間の位相関係は変化してしまう．よって，ある 2 頂点を結ぶ線分上の出力値を固定するには，それら 2 頂点間の関係を維持するための補助的な頂点を追加しなければならない場合がある．これは，訓練データが冗長になるだけでなく，三角形分割内に新たな副作用を発生させうるため，訓練データの調整にかかる作業コストを大きくする要因となる．

4. 制約付き Delaunay 三角形分割による拡張

制約付き Delaunay 三角形分割(CDT)[3]とは，Delaunay 三角形分割を一般化したグラフ構造である．CDT には制約された辺と制約されていない辺が存在する．もし制約された辺が存在しなければ，CDT は通常の Delaunay 三角形分割と同一である．図 3 に CDT の例を示す．図 3 では，図 1 と同一の点集合に対して，破線で示す辺を制約された辺として設定している．図から分かるように，制約された辺の導入によって，三角形分割内のある三角形の外接円の内部に，他の頂点が含まれる場合がある．

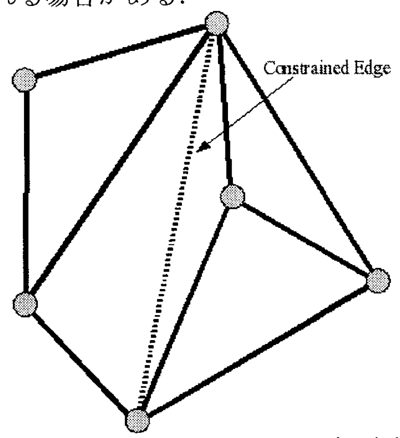

図 3 制約付き Delaunay 三角形分割

CDT の導入によって，訓練データを線分で与えることが可能となる．これは，ある 2 つの訓練データの間の位相関係を固定できることを意味する．さらに，凸包を構成しない三角形分割が許されるため，任意のポリゴン形状の領域に対して提案モデルを適用できる．

ただし，提案モデルでは，線分の訓練データを交差させることはできない．CDT を構成する際，制約された辺が交差していれば，交差する点の位置に新しい頂点が自動的に生成される．しかし，これらの新しい頂点は関数表現モデルの一貫性を損なってしまう．提案モデルでは，もし線分の訓練データが交差していれば，それらは不正な訓練データとする．

5. まとめ

本稿では，制約付き Delaunay 三角形分割を用いて従来の三角形分割を利用した関数表現モデルを拡張した．提案モデルによって，線分の訓練データによる位相関係の固定と，任意ポリゴン形状の対象領域を扱うことを可能とした．今後は，より冗長で誤差を含む訓練データへの対応を検討する予定である．

参考文献

[1] H. Akiyama, D. Katagami and K. Nitta, Training of Agent Positioning using Humans' Instruction, JACIII, Vol.11, No.8, pp.998-1006, 2007.

[2] M. Berg et al, Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer, 2000.

[3] L. P. Chew, Constrained Delaunay Triangulations, SCG '87, pp.215-222, 1987.