

論文の内容の要旨

論文題目 構築費用の空間的差異と移動費用を考慮した
ネットワークデザインに関する研究

氏 名 田端 祥太

本論文は、構築費用の空間的差異と移動費用を考慮したネットワークをデザインする手法を構築する。そして、現代の成熟した都市に新たに敷設が要請されるネットワークの合理的な計画を支援する知見を得ることを目的とする。

本論文では、ネットワークの構築にかかる費用（工事費用や土地の買い取り費用などに相当する）を構築費用と呼ぶ。他方、ネットワーク上で生じる拠点間の移動にかかる費用（燃料費や移動時間などに相当する）の総和を移動費用と呼ぶ。構築費用が小さなネットワークほど、ネットワークの実現可能性が大きく、また、移動費用が小さなネットワークほど、移動を伴う都市活動の持続可能性が大きいとみなせる。したがって、ネットワークの実現可能性と移動を伴う都市活動の持続可能性を最大化するには、構築費用を小さくし、かつ、移動費用を小さくすることが要請される。

上述の要請に応えるうえでの困難は、現代都市が、地形や地物、地価の影響を織り込んで複雑化しており、その結果、構築費用の空間的差異が生じていることにある。この状況を加味できれば、現代都市に対し新たに敷設が要請されるネットワークに対しても実用に資することができる。そこで本論文では、場所に応じた単位長さ当たりの構築費用を、重みという値で数値化した、重み付けられた空間を考える。そして、ネットワークの構築費用を、辺の長さに重みを乗じて足し合わせた「辺の重み付き長さの総和」で評価する。他方、移動需要が拠点間で一様であることを想定し、移動費用を、ネットワーク上の任意2拠点間のネッ

トワーク距離の総和を直線距離の総和で除して標準化した「平均迂回率」によって評価する。このとき、上述の要請は、「辺の重み付き長さの総和と平均迂回率を最小化する 2 目的最適化問題のパレート解を求める」ことに帰着する。本論文は、このパレート解を社会効率的ネットワークと呼び、発見的に求める方法を提案する。重み付けられた空間上で社会効率的ネットワークを構築することは、建築・陸・海・空のネットワークを考えるうえで大局的に共通する問題であり、また、抽象的な問題設定が同じであれば、本手法は都市のネットワークに限らず、汎用的に適用が可能である。

社会効率的ネットワークは、平均迂回率が最小になる完全グラフ、辺の重み付き長さが最小になる重み付き最小シュタイナー木、および、それらの間にある平均迂回率と辺の重み付き長さの総和のパレートフロンティア上に見出される。完全グラフは任意 2 拠点間を直線分で結ぶだけで構築でき容易である。他方、重み付き最小シュタイナー木や間にあるネットワークの構築に関する研究は希薄である。本論文では、前者に対しては幾何学的な考察に基づき最適解を探索するトップダウン的手法を、後者に対しては人の歩行軌跡の重畳という自然知能を活用したボトムアップ的手法を提案する。このように、パレートフロンティアの近似がトップダウン的手法とボトムアップ的手法の両輪でなされているのが本論文の特徴である。ふたつの手法の趣は異なるが、重み付けられた空間で最短路を探索できるように、ランダムドロネー網という数理幾何を用いている点で共通する。これらの方法により、辺の重み付き長さが最小のネットワークから平均迂回率が最小のネットワークまでの一連のパレート解を近似し、パレートフロンティアを可視化できる。可視化されたパレートフロンティアは、重み付けられた空間にある拠点を結ぶネットワークの構築費用と移動効率のトレードオフの関係の把握を助け、ネットワークデザインにおける合理的な選択を支援する。

本論文は、8 章で構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

1 章では、研究の目的と論文の特徴、構成を述べた後、本論文で用いる用語と頻出する変数、略記の定義を明確にする。

2 章では、関連する既往研究として、最短路探索、シュタイナー問題、ネットワークにおける迂回、人の歩行、自然知能を活用したネットワークの構築手法に関する研究を概観し、社会効率的ネットワークに主眼を置く本論文の位置づけを明らかにする。

3 章では、ネットワークの構築費用の最小化問題、すなわち、重み付きシュタイナー問題の発見的解法を構築する。頂点がとりうる位置をランダムドロネー網のノードの位置に限定し、辺をランダムドロネー網上の重み付き最短路で与える。そして、拠点のポロノイ図と重み付き最小シュタイナー木の関係に着目した探索範囲の限定とタブー探索法を用いた効率化を実装している。また、本解法の有効性を明らかにするために、既往の解法との比較を行う。具体的には、既往の研究で示されたベンチマークに本解法を適用し、本解法が既往の解法よりも、得られるネットワークの構成が厳密解により近いこと、辺の長さの総和がより小さな解が得られることを示している。さらに、領域に与えられた重みを連続的に変化させ

のに対して、重み付き最小シュタイナー木の形状が不連続に変化することを明らかにしたうえで、本解法を適用することで、重み付き最小シュタイナー木の不連続な変化の挙動を再現できることを明らかにしている。

4章では、人は歩行環境に応じた物理的・心理的移動抵抗を乗じた移動距離が最短になるように移動する、という仮定に基づき、人の歩行軌跡をシミュレーションするモデルを構築する。本モデルにより得られる経路は、屋外空間に顕在化した歩行軌跡を再現する。また、本モデルが屋外空間に顕在化した歩行軌跡を再現するような移動抵抗の推定結果から、移動抵抗の大小と地面の仕上げ・空間用途との関係を明らかにしている。具体的には、草地の移動抵抗は、公共施設や集合住宅の敷地外部に面する場所のように、社会規範に則った行動が求められるフォーマルな空間用途では相対的に大きく（舗装路の移動抵抗の1.2倍以上）、公園や集合住宅の中庭のように、自由な行動が許容されるインフォーマルな空間では相対的に小さく（舗装路の移動抵抗と同等程度）なる。土の地面の移動抵抗は、空間用途に関わらず、舗装路の移動抵抗と同等程度になる。

5章では、緑地において人の歩行軌跡が重畳してできるネットワーク（WTSN）をシミュレーション、その性能を分析する。エージェントの歩行軌跡は4章で構築したモデルをもとにしている。ただし、緑地の状態に応じて移動抵抗は動的に変化する。具体的には、緑地は、歩行されるたびに踏み分けられ移動抵抗が下がり、歩行されない間は植生が回復し移動抵抗が増加する。このメカニズムを表すために、移動抵抗の初期値、収束値、減衰速度、増幅速度というパラメータを導入する。WTSNの辺の長さの総和と平均迂回率を計測し、それらの2軸上にプロットすることで辺の長さの総和と平均迂回率のトレードオフを可視化している。そして、WTSNが、辺の長さの総和と平均迂回率の観点から理想的とされる近接グラフと同等かそれ以上に社会効率的であることを示している。さらに、移動抵抗の初期値が大きいほど、辺の長さの総和が小さく平均迂回率が大きくなり、移動抵抗の回復速度（＝増幅速度／減衰速度）が大きいほど辺の長さの総和が小さく平均迂回率が大きくなるという、パラメータの作用を明らかにしている。

6章では、5章で構築した手法を、重み付けられた空間に適用できるように拡張する。具体的には、シミュレーション開始時に2拠点間の社会効率的ネットワーク上をエージェントが歩行するように、移動抵抗を設定する。その際、エージェントの短距離選好度という新しいパラメータが導入される。それ以降の移動抵抗の増減などの手法の挙動は拡張前と共通である。出力されるネットワークの辺の重み付き長さの総和、平均迂回率とパラメータの関係を分析することで、移動抵抗の初期値、移動抵抗の回復速度は拡張前と同様の作用を示し、エージェントの短距離選好度が大きいほど、辺の重み付き長さが大きく平均迂回率が小さくなる作用があることを示している。さらに、既存の鉄道網よりも本手法で得られるネットワークの方が社会効率的であることを明らかにすると同時に、既存の鉄道網の社会効率的観点からみた合理性を、本手法を用いて議論することを通じて、本手法の有用性を示している。

7章では、大型ドローンの航空路網に本手法を適用するケーススタディを行う。大型ドローンの実用化に向けた動きは活発で、今後どのように社会実装されるかが議論になると考えられる。本章では、大型ドローンが設定された航空路網上を飛行すると想定する。そして、航空路網の構築には、送電線網と同様に線下地補償が生じると仮定する。この仮定の下、社会効率的な大型ドローンの航空路網の計画を想定したケーススタディを行っている。これを通じて、パラメータと計画上の戦略との対応関係を見出している。具体的には、＜エージェントの短距離選好度－重みの大きな場所を通すことで構築費用を上げて移動効率を高める戦略＞、＜移動抵抗の初期値－辺の長さを大きくすることで構築費用を上げて移動効率を高める戦略＞、＜移動抵抗の回復速度－移動需要の少ない辺を構築して公平性を高める戦略＞である。

8章では、本論文の成果と展望を述べる。

以上のように、本論文では、地形、地物、地価による構築費用の空間的差異を加味して、社会効率的観点から合理的にネットワークをデザインするための手法と知見を示した。本手法が考慮できるコンテキストは金銭的なものだけでなく、例えば、自然保全の必要性や居住地の用地収用交渉の困難さといったコンテキストも、それらに対応して割増した“構築費用”を考えることで加味し得る。本論文が提案した構築費用と移動費用のトレードオフを可視化する手法は、上述のように複雑化する都市のネットワークデザインの問題を解決する一助になる。