

氏 名	Htoo Htoo
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 904 号
学位授与年月日	平成 25 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Query Algorithms for Location Based Services in Road Network Distance (道路網距離による位置情報サービスのための検索アルゴリズム)
論文審査委員	委員長 教授 大澤 裕 委員 教授 島村 徹也 委員 教授 前川 仁 委員 准教授 堀山 貴史 委員 准教授 山田 敏規

論文の内容の要旨

In this thesis, query algorithms for location-based services (LBS) in road network distance is studied. Nowadays, spatio-temporal database research and technology have promoted a diversion of LBS applications in the real world. For example, car navigation systems, pedestrian navigation systems, logistic systems, travel information systems are some well-known LBS applications. Additionally, various spatial query methods have recently been proposed for LBS applications. Some typical queries are nearest neighbor queries, range queries, spatial join queries, and trip planning queries (TPQ). For these queries, the target points of a query are points of interest (POIs) which are, for instance, restaurants, convenience stores, and gas stations. Moreover, because spatial data are multidimensional data, data access methods and algorithms for spatial queries become important role. Therefore, the efficient indexing methods, R-tree indexing structure, for spatial query processing are basically applied to spatial databases.

Spatial query methods were mainly based on Euclidean distance in the beginning, and then their focus shifted to the road-network distance. The difference between using Euclidean distance and road-network distance is in the calculation cost. For example, the Euclidean distance between two arbitrary points can be computed easily, however, in the road-network distance, it takes longer processing time. In the existing literature, to obtain the distance between two points, we can use some well-known shortest path finding algorithms such as Dijkstra's algorithm and A* algorithm for spatial queries in LBS application. These algorithms are well applicable for the shortest path queries between two points. However, when users want to get the shortest paths to multiple targets in parallel by using usual existing algorithms, the processing time becomes very long. Therefore, the simultaneous searching algorithms from a single source to multiple target points are practically necessary.

In this thesis, a single source multi-targets A* (SSMTA*) algorithm to find the shortest paths to multi-target points simultaneously is proposed. This algorithm can reduce the unnecessary duplicated node expansions in spatial query more than in the usual A* algorithm because the nodes are expanded at most once. The incremental Euclidean restriction (IER) strategy is focused in which a set of candidate POIs based on their Euclidean distance from a query

point is rapidly generated. And then, the Euclidean distance for each candidate is verified by computing their road network distance. At this road network distance computation, we applied the proposed SSMTA* algorithm.

For trip planning queries such as optimal sequenced route (OSR) query and TPQ, we proposed a fast incremental algorithm to find OSR candidates following IER framework. The incremental search for OSR with IER framework has not been studied yet in the existing approaches. When IER framework is applied, OSR candidates in Euclidean distance are needed to generate incrementally first. Let the shortest OSR given by searches in Euclidean space be S_r and its verified length in the road network be $LN_{(S_r)}$. The shortest OSR in the Euclidean space is not always the shortest OSR in the road network distance. Therefore, all OSRs whose length are less than $LN_{(S_r)}$ also have the potential to be the shortest route in the road network. All OSRs less than $LN_{(S_r)}$ must be searched in the Euclidean space, and then the results must be verified in the road network. Finally, the shortest OSR in the road network is returned as the result. These are the essential steps of an OSR query based on the IER framework. We also proposed an efficient verification method for the road network distance. Besides OSR with IER framework, we proposed algorithms based on the incremental network expansion (INE) for it.

To evaluate the performance of the proposed SSMTA* algorithm, we applied it to several spatial queries; k -NN, aggregate nearest neighbor (ANN) queries. Besides, SSMTA* algorithm is applicable to other spatial queries in LBS applications.

Chapter 1 and 2 present introduction of LBS and related work.

Chapter 3 describes about the SSMTA* algorithm, which searches shortest paths between a query point and each point in a given destination point set. Then, this algorithm was applied for k -NN queries based on the IER strategy. Through the performance evaluation, the proposed method compared with existing works; the INE using Dijkstra's algorithm, the pairwise A* algorithm and the lower bound constraint (LBC). The proposed method outperforms the existing methods in processing time and in expanded node number. The processing times of the pairwise A* algorithm and the LBC increase rapidly when the density of POIs is low or the number of k is large. On the pairwise A* algorithm, nodes can be expanded several times when k is large, which increases the hard-disk access times. On the LBC, although the number of node expansions remains low, the cost of PQ scanning increases in proportion to k and the number of node expansions. This performance deterioration is serious when the density of the POI is low. The expanded node number and processing time of Dijkstra's algorithm remains twice that of the proposed method. From the viewpoint of database systems, however, the number of disk accesses dominates the total processing time. Accordingly, the proposed method is at least twice as efficient as the other methods.

Chapter 4 presents applications to ANN queries. A set of k -number of ANN candidates are incrementally generated with Euclidean distances by using the MBM algorithm with the R-tree index. By applying the SSMTA* algorithm, the road-network distances from each ANN candidate point in the set to all query points are verified. We proposed three methods; ANNPQ, ANNQP and ANNQPLB for ANN queries and compared them with existing works. The intensive experiments shows that SSMTA* algorithm outperforms the existing work in terms of processing time and expanded nodes number.

Chapter 5 introduces a fast framework for STP query on road network distance. It bases on IER framework. We proposed an incremental algorithm suitable for IER framework. Besides, we proposed a simultaneous search method named BDDC which is based on the SSMTA* algorithm. With various experimental results, we examined BDDC substantially outperforms previous methods in terms of both the expanded node number and the processing time.

Chapter 6 proposes an incremental OSR query in Euclidean distance based on IER framework. It is very first attempt for OSR in the incremental search. We describe based on both IER and INE framework. In IER framework,

firstly, an incremental search algorithm, the EOSR, for the Euclidean distance is presented. Compared progressive neighbor exploration (PNE), which is the only existing incremental algorithm applicable to the OSR in the Euclidean distance, experimental results demonstrate that the EOSR query significantly outperforms PNE, particularly when POIs are densely distributed or the number of POI categories to be visited during the trip is large. We also proposed an algorithm to determine only one shortest route; however, the top k shortest routes are sometimes required to facilitate users' choices. The algorithm proposed in this study can be easily adopted for this requirement because the EOSR generates candidates incrementally and the algorithm for verifying the road network distance can be easily applied to k OSR queries. For OSR query based on INE framework, the proposed algorithms USVPG, BSVPG are evaluated and with experimental results, the proposed methods is almost 100 times faster than PNE.

Chapter 7 concludes the thesis and describes future research.

論文の審査結果の要旨

近年、携帯電話やタブレット端末、カーナビゲーションシステムを利用端末とした位置情報サービス (Location Based Services: LBS) の活用が進んでいる。位置情報サービスにおいては、GPS などの測位装置により取得される現在位置に最も近いレストランなどの検索が行われる。この例でレストランのように検索の対象となる地理オブジェクトを POI (point of interest) と呼ぶ。この LBS に関する研究は 2000 年代になり活発化したが、その初期においては現在位置からユークリッド距離において近接するオブジェクトを検索する研究が行われた。一方、車や人は道路網に沿って移動する。その際に、ユークリッド距離による検索では近似的な解しか得られず、実際に道路網を移動した場合に近接するオブジェクトを検索することが求められるようになった。道路網距離とユークリッド距離の大きな違いは、その演算時間にある。2 点のユークリッド距離を求める演算は単純である一方、道路網距離を求める際には膨大な前処理データの参照か、長い処理時間の何れかを必要とする。本論文は以下の 7 章で構成されており、道路網距離に基づく位置情報サービスの為の効率良い各種検索のアルゴリズムを提案している。

第 1 章は序章であり、道路網距離に基づく LBS の概説と、本論文での主張点の要約、新規性について述べている。

第 2 章では、従来の関連研究について述べている。LBS で対象とする興味対象データ (POI) を管理するための空間データ管理構造、2 点間の道路網距離を求めるための各種アルゴリズム、典型的な空間検索方式、本研究で用いる基本的戦略としての IER (incremental Euclidean restriction) などの関連研究がまとめられている。

第 3 章では、LBS に適した道路網距離の検索方式が提案されている。ここで提案している多目的地 A* アルゴリズム (single-source multi-target A* algorithm) は、1 つの現在地から多数の目的地への道路網距離 (及びその経路) を並列的に求めるアルゴリズムである。本論文の 1 つの柱は、IER 即ち、ユークリッド距離での演算で高速に候補を絞り込み、その候補が道路網距離においても最適なものであるかを検証する枠組み、を各種空間検索に適用するものである。例えば、「現在位置に最も近いガソリンスタンドを 5 個求める」、検索は k NN 検索と呼ばれる。これを IER で実現するためには、まずユークリッド距離で 5 個以上のガソリンスタンドを求め、それらから道路網距離で最近接の 5 個を検証し決定しなければならない。ここで提案されている SSMTA* アルゴリズムは従来の A* アルゴリズムを多目的地に対して並列的に実行可能なように改良したものである。本章では、SSMTA* アルゴリズムについて述べ、それを k NN 検索に適用している。また実験により、従来方式に対して大幅な処理時間短縮が達成できていることが示されている。

第 4 章では、集約最近接検索 (ANN: aggregate nearest neighbor) を高速化する方式を提案している。ANN 検索とは、 m 個の検索点からある集約関数のもとで最適なオブジェクトを得る検索である。例えば、「別々の場所に住んでいる 3 人の友人がレストランに集まり食事をする」、という状況を考える。この場合に、例えば 3 人の総移動距離が最小になるようなレストランが最適となる。このような検索を IER の枠組みを用いて道路網距離で実行する研究は既になされていた。しかし、それらの方式では道路網距離での検証に多大な時間を要していた。本研究では、SSMTA* アルゴリズムを、この検証に適用することにより大幅な検索時間の短縮を実現している。

第5章, 6章は, 旅行計画について述べている. 旅行計画とは現在位置から最終目的地に向かう途中で, いくつかの種類の施設 (POI) を訪れる際の最短経路を求める問題である. 途中で訪れる施設の数が多い場合には NP 困難な問題となるが, LBS で要求される施設の高々 10 種類程度と想定されるため, 厳密解を求められる可能性がある. この問題を解くための2つの方式を提案している. 1つは INE (incremental Euclidean restriction) と呼ばれる枠組みに基づくものであり, 第5章で述べられている. ここでは途中で訪れる POI 種数が少ない (4 程度以下) を想定して, 従来方式に対して 100 倍程度高速な方式を提案している.

第6章では同じ問題を解く, より高速で規模の大きな問題にも適用可能な旅行計画方式を提案している. これは IER の枠組みに基づく最初の研究である. IER を旅行計画に適用するために, 本章ではまず, ユークリッド距離での旅行計画候補をインクリメンタルに求める方式を新たに提案している. また, その候補に対して道路網距離での検証を効率的に実行することにより, 道路網距離での最短経路を求める方式を提案している. また, この基本方式を詳細に検討し, 安定なものに改良している. 例えば, 途中で訪れる POI の分布密度が大きく異なる場合, 最後に最も密度の低い POI を決定しようとする, 演算時間が増大することを発見し, 分布密度が低い POI 種から決定している方式を提案している. また, IER の枠組みでは似た経路の探索が繰り返されることになり, 演算時間が膨大となる. この欠点に対応するため, 既に求まっている2点間の距離を VNG という構造に登録しておき, 既に求まっている経路長を道路網距離で再計算することを抑制している. これらの工夫により, 従来方式に比して大幅な速度向上とスケラビリティ (途中で訪れる POI 種数) を実現している.

第7章で, 本論文をまとめている.

以上に述べてきたように, 本論文は道路網距離に基づく LBS の為の各種検索アルゴリズムの高速化方式を提案しており, この成果は原著論文3件 (1件は採録決定), コースにおいて原著論文と同等と認められた国際会議5件の発表にまとめられている. 更に, 第5章で述べられている OSR アルゴリズムの提案では, 国際会議 WAIM2012 において best student paper award が授与されている.

これらの研究内容, 及び学会発表の成果から, 本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な内容を有するものと判断した.