

動的な地図に対するラベル配置問題に関する研究

Studies on Label Placement Problems for Dynamic Maps

情報工学専攻 横須賀 佑介

Yusuke YOKOSUKA

概要

ラベル配置問題とは地図中の対応する点に対して文字列やシンボルなどのラベルを配置する問題である。近年、商用の地理情報システム (GIS) アプリケーションにて動的な地図への重要性が高まっており、動的な地図に対するラベル配置問題が研究されてきた。しかし、これらの問題に対する理論的保証を持つアルゴリズムは、ラベルの配置位置があらかじめ決まっている、対応している操作のバリエーションが少ない、など実用上利用する上でのギャップはまだ大きい。

そのため本論文では、動的な地図に対する新たなラベル配置問題である、回転する地図に対するラベルサイズ最大化問題と、点重なり最小ラベル配置問題を導入し、それらに対する理論的保証を持つアルゴリズムを提案する。これらのアルゴリズムは、従来考えられてきた問題と比べ、実用的な問題設定に対応することができる。

今後さらに情報量が増え、地図だけに限らず様々な情報を可視化し、動的に操作して理解する必要性が高まっていくと考えられる。本論文の成果は、上記の問題設定と提案アルゴリズムを通し、それらの情報をより理解しやすくする方向性と、その方法を示したことである。

1 はじめに

ラベル配置問題は、入力された地図内の道路や施設などに、対応する文字列やシンボルを配置する問題であり、地理情報システム (GIS) や地図製作、グラフ描画など様々な分野で必要とされる。地域や河川、駅などのラベルは、入力された地図上で、対象物を理解できる位置に適切に配置される。ラベル配置問題では、対象物として点や辺、多角形などが考えられるが、本論文では、点に対するラベル配置問題である、点ラベル配置問題を扱う。

点ラベル配置問題では、各点に対するラベルの配置候補の数について、固定位置モデル [6] とスライダーモデル [12] と呼ばれる 2 つのモデルが考えられてきた。どちらのモデルも対象の点がラベルの境界に含まれるようにラベルを配置する。図 1 に例を示す。

従来、ラベル配置問題に対する多くの研究 (例えば、[13] を参照) がおこなわれており、主に 2 つの定式化が

扱われてきた。1 つはサイズが固定されたラベルを、互いに交わずに配置する数を最大化する、ラベル数最大化問題である。もう 1 つは、すべてのラベルを配置しながら、すべてのラベルで共通で利用するラベルの拡大率を最大化する、ラベルサイズ最大化問題である。これら 2 つの定式化に対する多くの研究は、従来静的な地図に対しておこなわれてきた。

近年、パーソナルマッピングシステムなど多くのアプリケーションにて動的な地図の重要性が増してきている。動的な地図としては、例えば地図の移動、回転、拡大縮小、点の移動などが挙げられる。このような背景の下、動的な地図に対するラベル配置問題が考えられてきた (例えば、[1, 2, 7, 8, 9, 10, 11] など)。これらの研究では、主にラベル数最大化が扱われていたが、ラベルの配置位置があらかじめ決まっている、対応できている操作のバリエーションが少ない、など実用上利用する上でのギャップはまだ大きい。

そのため本論文では、実用上利用可能で、かつ、理論的な保証を持つアルゴリズムを構築することを目指し、回転する地図に対するラベルサイズ最大化問題と点重なり最小ラベル配置問題を扱う。回転する地図に対するラベルサイズ最大化問題は、ラベルサイズ最大化の動的な地図への拡張の 1 つである。また点重なり最小ラベル配置

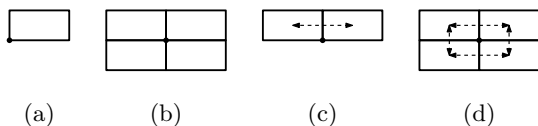


図 1. 固定位置モデルとスライダーモデルの例. (a) 1-ポジションモデル. (b) 4-ポジションモデル. (c) 1-スライダーモデル. (d) 4-スライダーモデル.

表 1. 動的な環境に対するラベル配置問題における本論文の成果の位置づけ. ★ がついたものは、ヒューリスティクスのみの提案であり、ついていないものは理論的保証を持つアルゴリズムが提案されていることを意味する.

問題設定	固定位置モデル		スライダーモデル	
	1-ポジションモデル	4-ポジションモデル	1-スライダーモデル	4-スライダーモデル
ラベル数最大化	拡大縮小 [2, 11] 回転 [9, 10] 点の軌跡 [7]	-	拡大縮小 (1 次元) [8]	-
ラベルサイズ最大化	回転 (2 節)	-	回転 (2 節)	回転 (2 節)
フリーラベル最大化	-	-	-	点集合の移動 [4]★
点重なり最小化	-	点集合の移動 (3 節)	-	-

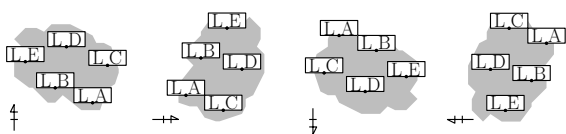


図 2. 回転する地図に対するラベルサイズ最大化の例. この例では“L A”, “L B” および “L C” によって最大拡大率が決定される.

問題は、航空機の情報が画面上を動的に移動する航空管制システムへの応用を考慮した問題である. 動的な地図へのラベル配置問題における、本論文で考慮する問題の位置づけを表 1 にまとめる. 本論文の成果は、表にも示したように、従来考えられてきた 1-ポジションモデルや 1-スライダーモデルよりも実用的な 4-ポジションモデル、4-スライダーモデルに対して、理論的保証を持つアルゴリズムをはじめ提案したことである. また、そのようなモデルにも適用できる問題設定を新たに導入したことである.

2 回転する地図に対するラベルサイズ最大化

前節で述べたように、動的な環境に対してはラベル数最大化が考えられてきた. また、理論的保証を持つアルゴリズムは、1-ポジションモデルに対してのみ与えられていた. そのため本節では、ラベルサイズ最大化の動的な環境への対応の 1 つとして、回転する地図に対するラベルサイズ最大化を考える (図 2). 以下ではまず、問題設定を説明する.

ラベルの集合 $L = \{l_1, \dots, l_n\}$ を持つ平面上の点集合 $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ を含む地図を M とする. また、ラベルは様々なサイズを持つ軸に平行な長方形とし、開集合であるとする. 各ラベル $l_i \in L$ の幅は $w_i > 0$ 、高さ

は $h_i > 0$ で表現され、ラベルの拡大率を σ としたとき、 l_i のサイズは $w_i\sigma \times h_i\sigma$ となる. すべてのラベルで共通の拡大率 σ が利用される.

各ラベル l_i は、アンカー点と呼ばれる点が p_i と一致するように配置される. アンカー点は l_i の内部、または境界上に配置される. 地図 M が 0 から 2π の角度の間で回転するとき、ラベルは地図の角度に対して水平であり、また互いに交わらない. さらに、拡大率および各ラベルのアンカー点は、回転中に変わらない. 本節で扱う問題は、上記を満たす中で最大の拡大率、およびアンカー点の位置を決定する. 通常の問題では、各ラベルは対象の点を境界に含むように配置されるが、本問題ではラベルが対象の点を内部に含む場合も考える. 前者の問題を MSBR (Maximization problem of the Size of labels with Boundary anchor points on Rotating maps) と呼び、後者の問題を MSR (Maximization problem of the Size of labels on Rotating maps) と呼ぶ. MSR の場合アンカー点の位置は、境界を含むラベルの内部であればどこでもよく、MSBR の場合、ラベルの境界であればどこでもよい. つまり、MSBR は 4-スライダーモデルである. この問題設定は静的な地図に対するラベルサイズ最大化の回転する地図への拡張である.

表 2 に、MSR および MSBR に対して本論文で得られた結果をまとめる. ここでは、いくつかのラベルの形状を扱う (例えば、単位正方形や単位高さ長方形). 静的な地図に対するラベルサイズ最大化は、単位正方形に対してでさえ、NP 困難 [6] であることが知られているが、いくつかのラベルの形状に対する MSR と MSBR は、驚

表 2. MSR および MSBR に対する結果. 各値は計算時間を示す.

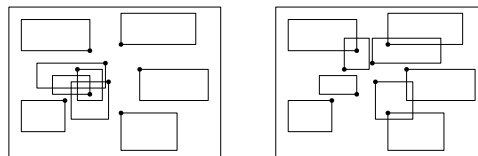
ラベルの形	MSR	MSBR
単位正方形	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$
正方形		$O(n \log n)$
単位高さ長方形	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$
長方形		$O(n \log n)$ (1/2-近似)

くべきことに多項式時間で解ける. 提案アルゴリズムでは, MSR および MSBR の最適解におけるアンカー点の位置が, あらかじめ決定できる性質を利用している. また, 計算時間を $O(n \log n)$ 時間とするために, 重み付き最近点対問題に対する Formann のアルゴリズム [5] のアイデアを利用する. さらに, このアルゴリズムを修正し, 特殊な長方形ラベルおよび 1-ポジションモデルに対する $O(n \log n)$ 時間アルゴリズム, 1-スライダーモデルに対する多項式時間アルゴリズムも与えた.

3 点重なり最小ラベル配置問題

航空管制システムにおいては, ラベルには航空機の位置だけでなく, 高度や速度のような重要な情報も含むため, すべてのラベルを配置する必要がある. そのため, 航空管制官は読むことができないラベルを読むために, 時間のかかる手作業でラベルの位置を移動させる. なお, ラベルのサイズは固定である.

この背景のもと, de Berg と Gerrits [3] はフリーラベル最大化問題を導入した. この問題は, 他のラベルと重なりがないラベルであるフリーラベルの数を最大化する. つまりこの問題設定では, 他のラベルを動かさずに読むことが可能なラベルの数を最大化する. しかし, フリーでないラベルを読むために, 重なっている他のラベルを移動させるためのコストは高くなる. 図 3(a) にフリーラベル最大化の最適解を示す. しかし, 航空管制システムに対する実際の応用を考慮した場合, この解は望ましくない. その理由を説明する. 同じ点に複数のラベルが重なっている場合, それらのラベルは互いを読めないものとしており, 航空管制官はそのラベルを読むために少なくとも 1 つのラベルを動かす必要がある. 航空管制官は, 画面上の航空機の位置を把握しながら, ラベルを確認するため, 1 つのラベルを見ることに時間がかかることよりも, 画面全体を走査しながら, 少しずつラ



(a) フリーラベル最大化. (b) 点重なり最小化.

図 3. (a) フリーラベル最大化と (b) 点重なり最小化の最適解の違い.

ベルの重なりを解消する方がよい.

よって, 手でラベルを移動させる数を削減するために, 以下の新たな問題を導入する.

定義 1 (点重なり最小化). 平面上の n 点集合 $\{p_1, \dots, p_n\}$ (これをラベル点の集合と呼ぶ) と軸平行な n 個の長方形ラベルの集合 $\{l_1, \dots, l_n\}$ で構成されたインスタンス I が与えられる. ここで, 各ラベル点 p_i にラベル l_i は配置されるとする. このとき, p_i は l_i の境界上にあるようにする. 平面上の任意の点 p に対して, 関数 $\lambda(p)$ を p に重なるラベルの数とする. I に対する点重なり最小化問題は, 平面上のすべての点 p の中で最大の $\lambda(p)$ を最小化する, すべてのラベルの配置位置を求めるものである.

図 3(b) は図 3(a) と同じ点集合に対する点重なり最小化の最適解を示す. フリーラベル最大化の最適解と比べ, すべてのラベルは他のラベルを動かすことなく読むことができる.

de Berg と Gerrits [3] は航空管制システムへの応用のための最初のステップとして, 静的な地図に対するフリーラベル最大化のみ扱っていた. しかし本論文では, 各点が移動する場合の点重なり最小化も扱う. この問題では, ラベル点が移動する軌跡は δ 次 (δ は定数) の多項式であらかじめ与えられているものとする. また, 一度ラベル配置位置を決定したら, 点集合が移動する間にラベルの配置位置は変わらない. なお, 移動する点集合に対するフリーラベル最大化も考えられている [4] が, 提案されているのはヒューリスティクスであり, 理論的な保証はない.

上記の問題に対し, まず任意の長方形ラベルに対する LP 緩和を利用した 4-近似アルゴリズムを提案した. このアルゴリズムは, 静的な点重なり最小化および, 移動

する点集合に対する点重なり最小化双方に利用できる。計算時間はそれぞれ $O(n^6)$, $O(n^{10})$ である。ここで扱うのは、4-ポジションモデルのみである。

さらに、単位正方形ラベルに対する、 $O(n^2)$ 時間 8-近似組合せアルゴリズムを提案した。ここでは、4-ポジションモデルだけでなく、4-スライダモデルも対象とする。提案アルゴリズムは、サイズが 1 の正方格子を考え、その各頂点に最適解にて重なるラベルの数を下界 D として利用する。また、正方格子の各頂点に高々 $2D$ 個のラベルだけが重なるように、貪欲的にラベルを配置できることを示し、8-近似アルゴリズムを得る。

なお、4-ポジションモデルおよび 4-スライダモデルに対する点重なり最小化は、NP 困難であることに注意する。この結果は、[6, 12] のような他の NP 困難なラベル配置問題からの帰着により、簡単に得られる。

4 おわりに

本論文では、動的な環境に対するラベル配置問題における、実用上利用可能であるアルゴリズムと、理論的保証を持つアルゴリズムとの間のギャップに着目した。また、そのギャップを埋めることを目指し、回転する地図に対するラベルサイズ最大化問題、および点重なり最小ラベル配置問題を新たに導入し、それらに対するアルゴリズムを提案した。本論文の成果は、動的な地図に対し、他のラベル配置問題と比べ実用的な問題設定において、理論的な保証を持つアルゴリズムを提案したことである。また、IoT やビッグデータの隆盛により今後も加速度的に情報量が増え、地図だけでなく様々な情報を可視化し、ユーザが動的に操作し理解していく必要性が高まっていく中、その情報をより理解しやすくする方向性とその方法を示したことである。

今後の課題としては、上記ギャップを埋めるために、複数の操作に対応することや、地図以外への対応など、様々な動的な状況に対する理論的保証を持つアルゴリズムを提案することが挙げられる。

謝辞

本論文のみならず、学部 4 年の頃から 15 年間にわたりご指導賜りました中央大学理工学部情報工学科 今井桂子 先生には、深く感謝し、厚く御礼申し上げます。また、本論文をまとめることができたのは、これまでご指

導、ご助言、ご鞭撻下さった多くの皆様のおかげです。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Been, E. Daiches, and C.-K. Yap. Dynamic map labeling. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 12(5):773–780, 2006.
- [2] K. Been, M. Nöllenburg, S.-H. Poon, and A. Wolff. Optimizing active ranges for consistent dynamic map labeling. *Comput. Geom.*, 43(3):312–328, 2010.
- [3] M. de Berg and D. H. P. Gerrits. Approximation algorithms for free-label maximization. *Comput. Geom.*, 45(4):153–168, 2012.
- [4] M. de Berg and D. H. P. Gerrits. Labeling moving points with a trade-off between label speed and label overlap. In *Algorithms - ESA 2013 - 21st Annual European Symposium. Proceedings*, pages 373–384, 2013.
- [5] M. Formann. Weighted closest pairs. In *STACS 93, 10th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. Proceedings*, pages 270–281, 1993.
- [6] M. Formann and F. Wagner. A packing problem with applications to lettering of maps. In *Proceedings of the Seventh Annual Symposium on Computational Geometry*, pages 281–288, 1991.
- [7] A. Gemsa, B. Niedermann, and M. Nöllenburg. Trajectory-based dynamic map labeling. In *Algorithms and Computation - 24th International Symposium, ISAAC 2013, Proceedings*, pages 413–423, 2013.
- [8] A. Gemsa, M. Nöllenburg, and I. Rutter. Sliding labels for dynamic point labeling. In *Proceedings of the 23rd Annual Canadian Conference on Computational Geometry*, 2011.
- [9] A. Gemsa, M. Nöllenburg, and I. Rutter. Consistent labeling of rotating maps. *JoCG*, 7(1):308–331, 2016.
- [10] A. Gemsa, M. Nöllenburg, and I. Rutter. Evaluation of labeling strategies for rotating maps. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 21(1):1.4:1–1.4:21, 2016.
- [11] C. Liao, C. Liang, and S. Poon. Approximation algorithms on consistent dynamic map labeling. *Theor. Comput. Sci.*, 640:84–93, 2016.
- [12] M. J. van Kreveld, T. Strijk, and A. Wolff. Point labeling with sliding labels. *Comput. Geom.*, 13(1):21–47, 1999.
- [13] A. Wolff and T. Strijk. The map-labeling bibliography, 2009.