

# 3次元都市地図における経路の重なりを回避したレイアウトの自動生成

## Automated Occlusion-free Layout of Routes in 3D Urban Maps

廣野大地 † Daichi Hirono † 吳湘筠 ‡ Hsiang-Yun Wu ‡ 有川正俊 ‡ Masatoshi Arikawa ‡ 高橋成雄 ‡ Shigeo Takahashi ‡

†‡ 東京大学 The University of Tokyo  
E-mail: †hirono@visual.k.u-tokyo.ac.jp

### 1 はじめに

3次元表示された地図は、平面表示の地図に比べて、投影図に3次元情報を知覚できる奥行き手がかかりが多く含まれるため、我々が普段目にする実世界に近い景観を提供する。そのため、現実との対応関係が重視されるカーナビゲーションシステムで利用されてきたほか、携帯端末・ブラウザ上においても、その表示性能の向上にとともに、3次元地図表示機能が利用されはじめています。しかし、建物や道路の3次元的位置関係を忠実に表示するだけでは、手前のオブジェクトが奥のものを隠してしまう遮蔽の問題が生じてしまう。特に都市地図上では、背の高い建物が多く存在するため、目的地までの経路が見えなくなることが多い。建物を半透明に表示するなどの工夫を施しても、経路が幾重にも建物に遮蔽されると、その奥行き感が失われてしまう問題が残る。

本研究では、都市地図に変形を施すことで、自動的に経路の遮蔽を回避する都市地図の3次元表示手法を示す。都市地図には、平行線などの奥行き手がかかりが多く含まれるため、それらを違和感なく変形することが技術的に難しい。本手法では、遮蔽回避に必要な変形を制約条件として定式化し、線形計画法を用いた最適化を行う。具体的には、地図へのマージンの挿入と、建物の高さの削減の2種類の変形を定義し、変形量の合計が最小となるような変形箇所と変形量の組み合わせを求める。また、仮にすべての遮蔽の回避が不可能な場合でも、実現可能な範囲で最適な変形を求めるための定式化を実現していく。

### 2 関連研究

地図の3次元表示において、経路の遮蔽を回避する試みは、まずTakahashiら[7]による山岳地図に適用したものが挙げられる。Takahashiらの手法は、山岳地域など滑らかな曲面として表現される地形形状から特徴点を抽出し、その特徴点の配置へ相対的な位置関係を保ちながらバネモデルを用いた変形を施すことで、経路の遮蔽を回避している。Möserら[4]は、地形形状のある特定の凹曲面に変形し、視点から遠い領域がこちら側を向くようにすることで、視点から近くのオブジェクトは透視投影図として、視

点から遠いオブジェクトに対しては上方から見た平面図のような画像を生成し、すべてのオブジェクトが遮蔽されることなく可視化できる手法を提案している。Degenerら[2]は、地形形状の変形を変分法を利用して定式化を行い、遮蔽回避の問題を地形形状変形の最適化問題として解いた。Cuiら[1]は、遮蔽回避のための対象シーンの変形を、視線を曲げることで定式化を行い、GPUを用いた実時間レンダリング可能な手法を提示した。

これらに対し、対象を都市地図に限定し、都市の構造を利用しながら道路や建物の配置を変形する手法も提案されてきている。Grablerら[3]は、区画に含まれる建物を縮小し、道路の見やすさを向上させる手法を示した。本手法に最も関係深いのが、Quらの手法[6]である。Quらは、建物が密に混在する複雑な都市地図において、画像処理におけるseam carvingの手法を利用した経路の拡大を行い、その後建物の高さを削減するという段階的な変形を行うことで、経路と建物の重なりを回避している。

我々の提案手法は、地図にマージンを挿入し建物の高さを調節することで道路の遮蔽を軽減するという点で、Quらの手法と共通している。しかし提案手法は、経路の遮蔽回避のために必要なマージンの挿入量や高さの削減量を計算を、線形計画法による制約付き最適化問題として数理的に定式化している点が大きく異なる。そのため、マージンの挿入が複数の遮蔽を解決する場合はマージンの挿入が優先され、逆に1つだけ高さの高い建物がある場合はその建物の高さの削減が優先されるなど、地図特徴の遮蔽回避を行う際に、解決度合いが高い変形を適応的に選択できる。また、マージンの挿入に対するコスト、建物の変形に対するコスト、および経路と建物の重なりに対するコストのバランスを変更することで、施される地図変形の度合いを明示的に制御可能である点が特筆に値する。

### 3 提案手法

提案手法では、単一の平面上に存在する道路や建物の位置情報と視線方向、および遮蔽を回避したい経路を入力にとり、3次元都市地図モデルを平行投影した場合に、経路の遮蔽ができるだけ回避されるような地図の変形を出力として返す。

まず、建物と経路の重なりを解消するための変形について考える。いま、図 1(a) のように、B の位置にある高さ  $h_B$  の建物によって、R の位置にある経路が遮蔽されているとする。このとき、経路が建物によって遮蔽する領域の外に出るためには、

- 建物の高さを低くする
- 建物を経路から遠ざける

の 2 つの操作が考えられる。本手法では、これを

- 建物のある割合で縮小する
- 建物と経路の間にマージンを入れる

という 2 つの変形操作として実現していく。図 1(b) は、このような 2 つの変形操作を施した例を示している。さらに、これらの操作に伴う地図形状の変形量は、オリジナルの都市地図の景観を保つ意味でも、なるべくであれば必要最小限に留めておきたい。

このような考察に基づき、本手法では地図の変形問題を最適化問題として定式化を行う。具体的には、地図の変形量を目的関数として定式化し、その最適化を行うことで、必要最小限の変形量を求めていく。さらに遮蔽回避の条件は、図 1 から明らかな通り、高さあるいは奥行きに関する不等式として表現が可能である。そこで本研究では、上記の遮蔽回避の地図変形の問題を、線形計画法を用いて、制約付き最適化問題として定式化を行っていく。

このような、制約付き最適化問題として地図上の情報の配置を最適化するものとして、Nöllenburg ら [5] の地下鉄路線図のレイアウトを求めるものがある。この手法では、路線図中の各駅の位置やラベルをつける方向などを未知変数とし、路線の曲がり具合や長さや変形前の位置関係などから、求めるレイアウトが満たすべき条件を混合整数計画法の制約不等式や目的関数として定式化している。しかし、この地下鉄路線図の制約付き最適化問題は 2 次元の配置問題であるのに対し、本手法は、対象となる地図情報が 3 次元であり、かつ地実現すべき地図配置の美的基準が経路の遮蔽回避という性質が全く異なる制約であるため、新たな定式化が必要となる。

### 3.1 奥行き方向における制約と変形量の定式化

はじめに、経路 R と、変形前に R を遮蔽している建物 B の組を考え、この重なりを解消する条件を示す制約式を求める。このようなすべての組の集合を **pairs** とし、各組について建物 B の変形前の高さを  $h_B$ 、変形による高さの削減量を  $c_B$ 、B と R の変形前の距離を  $d_{(B,R)}$ 、変形によって B と R の間に挿入されるマージン量を  $m_{(B,R)}$  とする。簡単のためここでは経路と建物の位置を図 1 のように数直

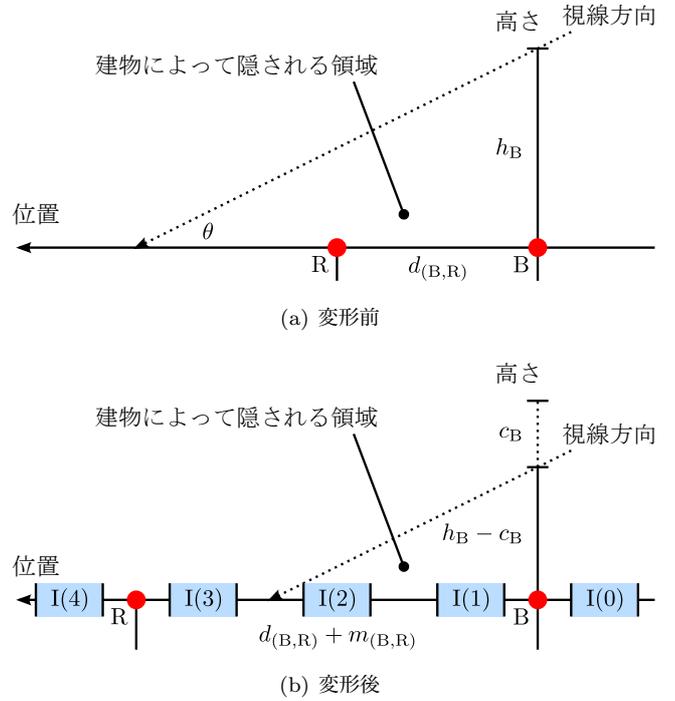


図 1: 定式化の概要で用いる各記号の位置関係

線上の点として表現する。このとき変形によって B による R の遮蔽が解消されるための  $c_B$  と  $m_{(B,R)}$  の条件は、以下の 1 次不等式制約として表現される。

$$d_{(B,R)} + m_{(B,R)} \geq \frac{1}{\tan \theta} (h_B - c_B) \quad (1)$$

次に、変形量の総和を式で表す。高さの削減量については建物ごとに独立して設定されるため、 $c_B$  の和が地図全体での高さ削減量となる。ただし、高さが異なる建物から同じ量の高さが削減されても、もとの高さによって見た目に与える影響は異なる。そこで定式化には削減量がもとの建物の高さに対する比率となるように  $c_B$  を正規化した  $c'_B$  を利用する。

$$c'_B = \frac{1}{h_B} c_B \quad (2)$$

マージンの挿入量についてはあるペア (B, R) 間に挿入されるマージンが他のペア (B', R') 間に挿入されるマージンと重複し得るため、各ペアでの挿入量  $m_{(B,R)}$  の合計が必ずしも地図全体の変形量とならない。そこで、地図上にマージンの挿入箇所 I をいくつか設定し、すべてのマージンはいずれかの挿入箇所に追加されると考える。この場合、ある挿入箇所 I でのマージンの挿入量を  $m_I$  とすると、その和は地図全体のマージンの挿入量となる。また B と R の間に存在し、そこに挿入されたマージン量が  $m_{(B,R)}$  に含まれるような挿入箇所の集合を **between**(B, R) とすると、制約式 (1) の項  $m_{(B,R)}$  は

$$m_{(B,R)} = \sum_{I \in \text{between}(B,R)} m_I \quad (3)$$

となる。

最後に、解くべき最適化問題を示す。

$$\min \sum_B c'_B + \sum_I m_I \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & d_{(B,R)} + \sum_{I \in \text{between}(B,R)} m_I \\ & \geq \frac{h_B}{\tan \theta} (1 - c'_B), \forall (B,R) \in \text{pairs} \quad (5) \end{aligned}$$

これは  $m_I$  と  $c_B$  を未知変数とした線形計画問題であり、単体法を利用して効率よく解くことができる。

### 3.2 一般的な地図配置における制約式の構成

節 3.1 では建物と道路が数直線上に存在するとして線形計画問題を構成したが、実際には道路や建物とも一般的な位置関係にあり、平行に並ぶとは限らない。ここでは、実際に本手法が扱う地図での制約式を求める。入力として与えられる道路は線分のつながりとして、建物は角柱として表現され、道路の各頂点と角柱の底面は高さ 0 の平面上に存在すると仮定する。いま、入力地図の中心を原点にとり、奥行き方向が  $z$  軸、水平方向が  $xz$  平面に対応し、視線方向ベクトルが  $yz$  平面に含まれる座標系を考える (図 2)。

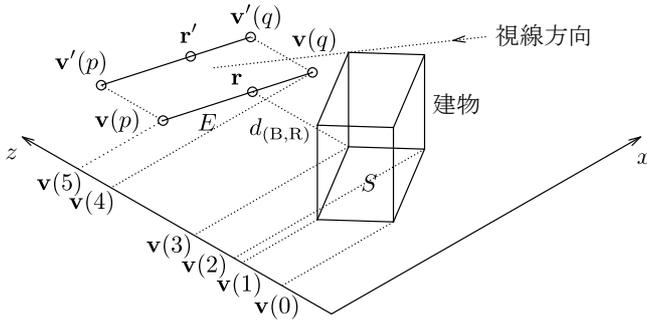


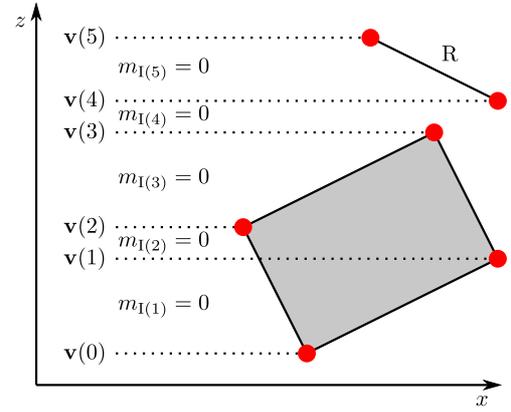
図 2: 一般の配置における経路と建物の位置関係

次に、 $xz$  平面上にあるすべての道路上の頂点と各建物の底面多角形の頂点座標へ、 $z$  座標値が小さい順に  $\mathbf{v}(0), \mathbf{v}(1) \dots$  と番号をふり、番号が隣接する頂点ペア  $\mathbf{v}(j-1)$  と  $\mathbf{v}(j)$  の間にマージンの挿入箇所  $I(j)$  があるとする (図 3)。マージンは  $x$  軸方向に伸びた帯のように挿入され、挿入箇所より奥に位置する全頂点をさらに奥へと移動させる。これにより、変形後の頂点  $\mathbf{v}'(j)$  の  $z$  座標値は

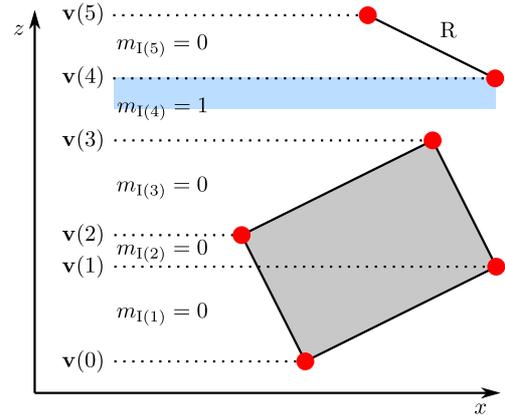
$$v'_z(j) = v_z(j) + \sum_{k=0}^j m_{I(k)} \quad (\text{ただし } m_{I(0)} = 0) \quad (6)$$

となる。

ある建物  $B$  と経路を構成する線分  $R$  の距離  $d_{(B,R)}$  を、 $B$  を  $z$  軸正方向へ動かした時に初めて  $R$  ぶつかるまでの移動量とし、さらに  $B$  の底面  $S$  と接する  $R$  上の点を  $\mathbf{r}$ 、 $R$  と接する  $S$  の頂点を持つ  $\mathbf{v}$  のインデックスを  $c$  とする。  $B$  が  $R$  の奥にある場合や  $B$  と  $R$  が共通の  $x$  座標を持たない場



(a) 変形前



(b)  $m_4 = 1$  による変形後

図 3: マージン量と頂点  $z$  座標値の関係

合は、このペアの重なりは生じないため  $d_{(B,R)}$  や制約不等式を定義しない。

経路を構成する線分  $r$  の 2 つの端点を持つ  $\mathbf{v}$  のインデックスを  $p, q$  とし、 $\mathbf{r}$  の内分比を  $(1-t) : t$  とすると、 $\mathbf{r}$  とその変形後の点  $\mathbf{r}'$  は、内分比が変わらないため、以下の関係が成立する。

$$\mathbf{r} = t\mathbf{v}(p) + (1-t)\mathbf{v}(q) \quad (7)$$

$$\mathbf{r}' = t\mathbf{v}'(p) + (1-t)\mathbf{v}'(q) \quad (8)$$

また変形後の  $B$  と  $R$  の距離  $d_{(B,R)} + m_{(B,R)}$  は  $\mathbf{v}(c)$  の変形後の点  $\mathbf{v}'(c)$  と  $\mathbf{r}'$  の  $z$  座標値を用いて

$$d_{(B,R)} + m_{(B,R)} = r'_z - v'_z(c) \quad (9)$$

$$= tv'_z(p) + (1-t)v'_z(q) - v'_z(c) \quad (10)$$

となる。これを式 (1) に代入して以下の制約式を得る。

$$tv'_z(p) + (1-t)v'_z(q) - v'_z(c) \geq \frac{h_B}{\tan \theta} (1 - c'_B) \quad (11)$$

### 3.3 実データへの応用のための定式化の工夫

これまで述べた線形計画問題の定式化を、実世界の地図データに対して直接適用すると、適切な解が見つからない

場合が多い。本手法では以下の様な工夫を施すことで実際の地図データに対しても遮蔽回避が問題なく実現するようにしている。

### 1. エラー変数の導入

複雑な都市地図の場合、不等式 (11) が常に満たされとは限らない。この不等式条件を緩和するためのエラー変数  $e_{(B,R)}$  を制約不等式の左辺に加え、そのエラーを最小化することで、遮蔽回避が完全に実現できなくても、適切な地図形状の変形を求められるようにしている。

### 2. 変形量の制限

地図の変形をある一定程度に抑えるための制約として  $m_I, c_B, e_{(B,R)}$  にそれぞれ次のように上下限を設定する。ここではある挿入点に対して設定されるマージン量の上限を挿入点が存在している区間の幅の 10 倍とし、建物は半分以下の高さに縮小しないという条件に加え、エラーは必ず 0 以上である条件を設定している。

$$0 \leq m_{I(j)} \leq 10(v_z(j) - v_z(j-1)) \quad (12)$$

$$0.5 \leq c_B \leq 1 \quad (13)$$

$$0 \leq e_{(B,R)} \quad (14)$$

### 3. 各変形に対する重みの設定

変形結果を調整できるように目的関数のマージン量と高さ削減量、およびエラー変数にそれぞれ重み  $\alpha, \beta, \gamma$  を乗ずる。これにより、それぞれのコストの影響をユーザーが調節することが可能となる。

これらの工夫によって最終的に解くべき線形計画問題は以下ようになる。

$$\min \quad \alpha \sum_I m_I + \beta \sum_B c'_B + \gamma \sum_{(b,r) \in \text{pairs}} e_{(B,R)} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} & tv'_z(p) + (1-t)v'_z(q) - v'_z(c) + e_{(B,R)} \\ & \geq \frac{h_B}{\tan \theta} (1 - c'_B), (B, R) \in \text{pairs} \end{aligned} \quad (16)$$

$$0 \leq m_{I(j)} \leq 10(v_z(j) - v_z(j-1)), \forall I \quad (17)$$

$$0.5 \leq c_B \leq 1, \forall B \quad (18)$$

$$0 \leq e_{(B,R)}, \forall (B, R) \in \text{pairs} \quad (19)$$

## 4 結果

本アルゴリズムを実装し、実際の都市データに適用した結果を示す。実験環境として用いたプロトタイプシステムは表 1 である。入力として、各変形のコストは特に明示しない限りそれぞれ  $\alpha = 10, \beta = 1, \gamma = 3$  を与え、視線方向

CPU	Intel Core i7-2760QM
Memory	8GB
OS	VMWarePlayer 上で動作する Ubuntu 10.10
実装言語	C++
LP Solver	GLPK
3D 表示	OpenGL
幾何計算	CGAL

表 1: 実験環境

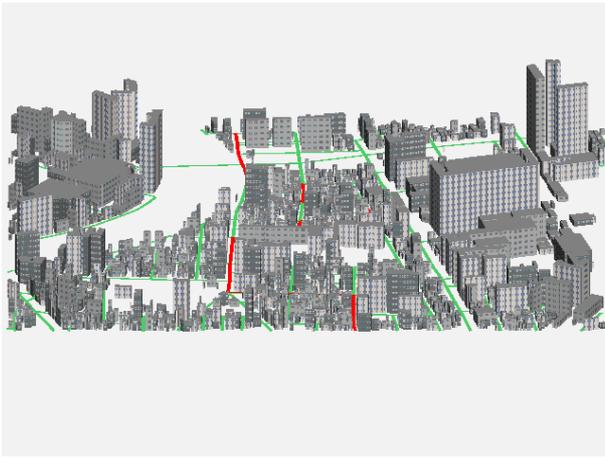
が地面となす角はカーナビゲーションシステムの 3 次元表示を参考に 20 度とした。図において、遮蔽を回避する道路とその他の道路をそれぞれ赤色と緑色で示し、変形にかかった時間はキャプションにミリ秒単位で記載した。

変形の対象として、次のものを選択した。

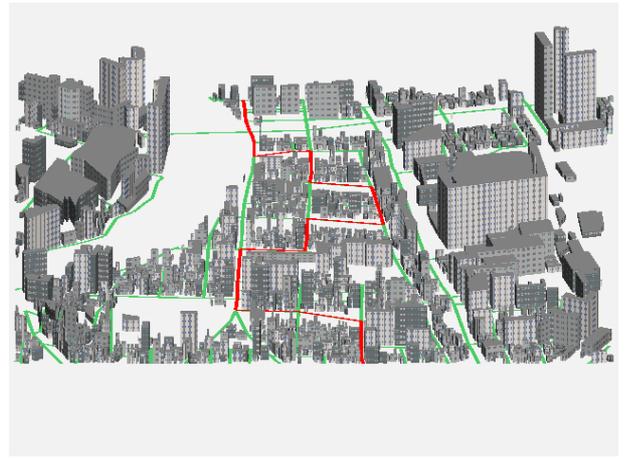
- 経路が直線で構成されその方向が視線に対し水平・垂直なもの (図 4)
- 経路が直線で構成されその方向が視線に対しおよそ斜め 45 度方向のもの (図 5)
- 経路が曲線で構成されているもの (図 6)
- 経路が高い建物の後ろにあるもの (図 7)
- 建物が弧状のもの (図 8)
- 建物が経路の片側のみを隠しているもの (図 9)

まず、建物との重なりを回避すべき経路が直線で構成され、その方向が視線に対し水平・垂直な例に対して変形を実行した。本手法は視線方向へマージンを挿入するためこの例では比較的容易に重なりを回避できること予想されるが、実際にも図 4 に示される通り大部分の重なりが回避されている。また経路が視線方向に走っている部分はもともと遮蔽がなく変形の必要がないため、元の形がそのまま維持されている。画像下部の建物が経路と重なってしまっているのは、この建物の高さが限界まで削減されており、ここでマージン量の値を増やして地図に大きな変形を加えるよりも、エラー変数の値を増やすことでこの重なりを無視するほうが目的関数の値を小さくできるからである。実際に、マージンを挿入する操作に対する重みをより小さくした図 4(c) の例では、この部分の地図形状がより変形されている。

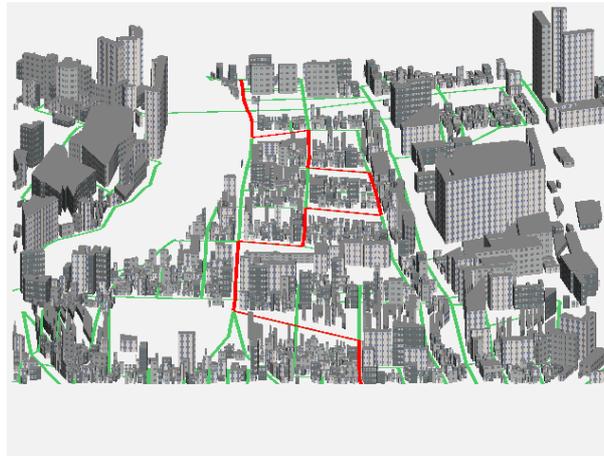
図 4 と同じ地図と経路を、斜め 45 度方向から見て変形したのが、図 5 である。斜めの経路が指定されると、道路線分のうち 1 つの頂点は建物より奥にあり、もう 1 つの頂点は建物より手前にある、ということが起こりうる。この場合遮蔽を回避するためにマージンをに入れて動かすことができるのは、建物より奥の頂点のみであるため、より遮蔽



(a) 変形前



(b) 変形後 (936ms)



(c) 変形後 ( $\alpha = 10, \beta = 1, \gamma = 50, 960ms$ )

図 4: 経路が直線で構成されその方向が視線に対し水平・垂直なもの (神奈川県横浜市鶴見区)

の回避が難しいと予想される。結果でも図4と比較して遮蔽を回避しきれていない部分が多いことが確認できる。遮蔽を回避するためにはより多くのマージンを挿入する必要があるが、そうした場合、図5(c)のように実際の地図とかけ離れた画像が生成されてしまう。

図6は経路が曲線で構成されているものである。本手法ではもともと道路を線分の集合として扱っているため、そのまま曲線の道路も細かな線分の集合として扱うことができる。ただし、図5で見られた斜めの線分がもつ問題は残っている。

図7は経路が高い建物の後ろを走っている場合である。変形前は完全に指定された経路が隠れている。建物の高さに比例して遮蔽領域も広がるため、より大きな変形が必要になっている。

図8では建物が弧状になっており、その中に経路が入り込んでいる。この場合も斜め線分の影響で変形がしにくくなっている。図8(c)のように建物が遮蔽する領域が少なければ可能な変形の範囲で遮蔽の回避を行うことができる。

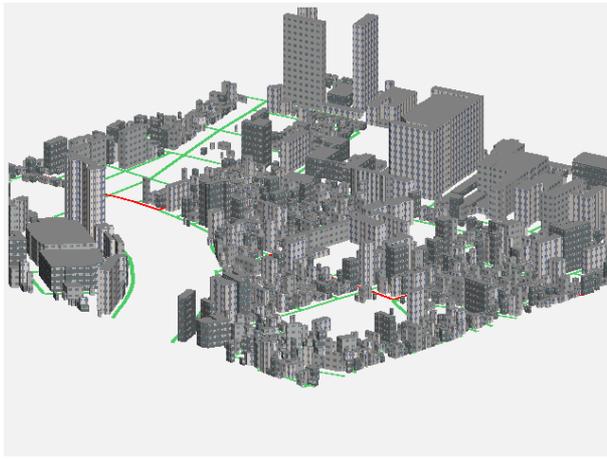
図9では、ある建物が遮蔽を回避したい経路の片側のみを隠している。本来であればこの経路が水平方向に移動す

るような変形を行うことで、少ない変形量で遮蔽の回避を実現できるが、本手法では視線方向へマージンを入れていくため、経路が建物の上へ移動されてしまっている。

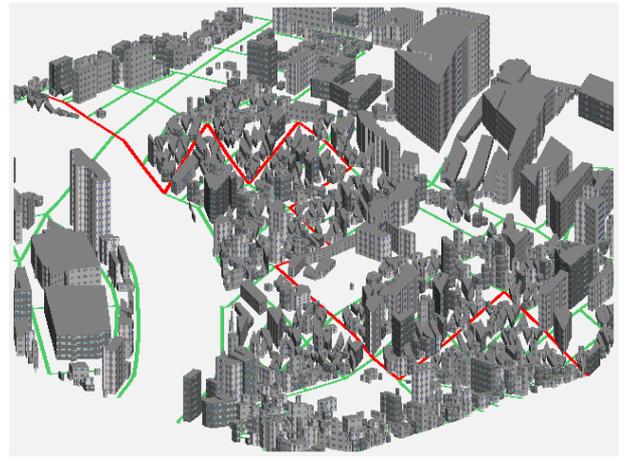
以上の結果が示す通り、遮蔽の回避がうまくいかない場合はマージンの挿入の仕方が原因になっていることが多い。现阶段ではマージンの挿入方向が視線方向に限られているため、図5のように単に視線方向が変わっただけでも遮蔽の回避の度合いに影響がある。また、局所的にマージンを入れることができないため、図8のように周囲に大きな影響を与え、図9のようなケースに対して、経路を視線方向に対して垂直に移動させることで遮蔽を解決することができない。(大局的なマージンの挿入では経路を隠している建物も同時に移動させてしまう)

また、図7のようにそもそも建物の遮蔽領域が大きく、マージンの挿入のみでは変形に限界がある場合もある。

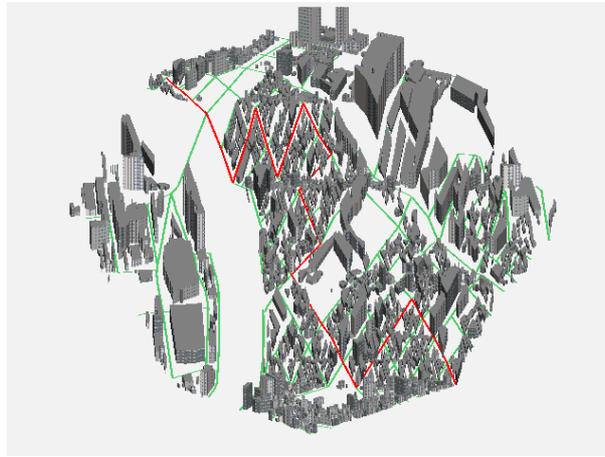
よって今後の課題として、多方向・局所的なマージンの挿入法を定式化することや、建物の高さを視覚的に自然にかつより大きく削減する方法の導入、高さ方向だけでなく前後左右方向のサイズを削る方法の導入を検討する必要がある。



(a) 変形前



(b) 変形後 (10320ms)



(c) 変形後 ( $\alpha = 10, \beta = 1, \gamma = 50, 10431ms$ )

図 5: 経路が直線で構成されその方向が視線に対しおよそ斜め 45 度方向のもの (神奈川県横浜市鶴見区)

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、3次元の都市地図において建物と経路の重なりを回避するために、地図へのマージンの挿入と建物の高さの削減という2つの変形を線形計画法として定式化し、変形を行う手法を示した。線形計画法による定式化を行ったことで、マージンの挿入と建物の高さの削減という2つの変形を組み合わせ、できるだけ変形量の少ない解を得ることができた。

結果画像にも示されている通り、本手法ではすべての遮蔽を完全に回避できるわけではない。より多くの遮蔽を回避するためには、各変形の重みを下げたりエラー変数の重みを上げたりすればよいが、現在の手法では局所的なマージンの挿入を行うことができないため、地図全体が歪み、結果として不自然な変形が行われてしまう。また、マージンを挿入する方向が視線方向のみであるため、斜め方向の経路に対する遮蔽を解消できない場合がある。今後の課題として、変形を道路ネットワークの構造を考慮して行うことや、奥行き手がかりなどをより積極的に用いることで視覚的に自然かつより大きな建物の変形を実現することな

どを検討したい。

その他の課題として平行投影図からの透視投影図への変換や、アニメーション表示の際の時間方向への連続性を保った変形、およびユーザースタディーの実施などがあげられる。

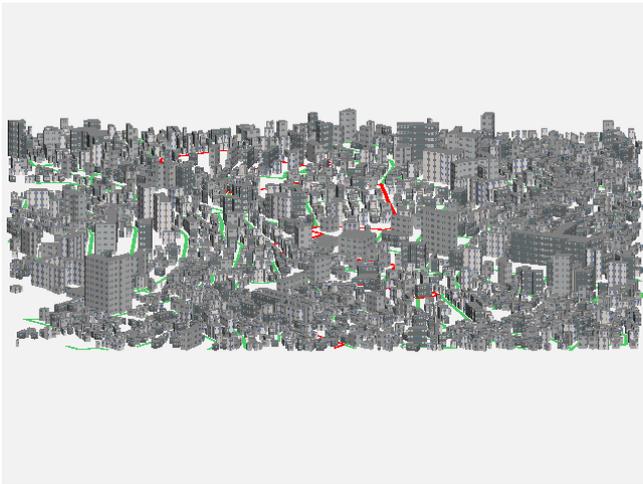
## 謝辞

本研究は、東京大学空間情報科学研究センターの空間データ利用を伴う共同研究 (No.398) による成果であり、以下のデータを利用した。

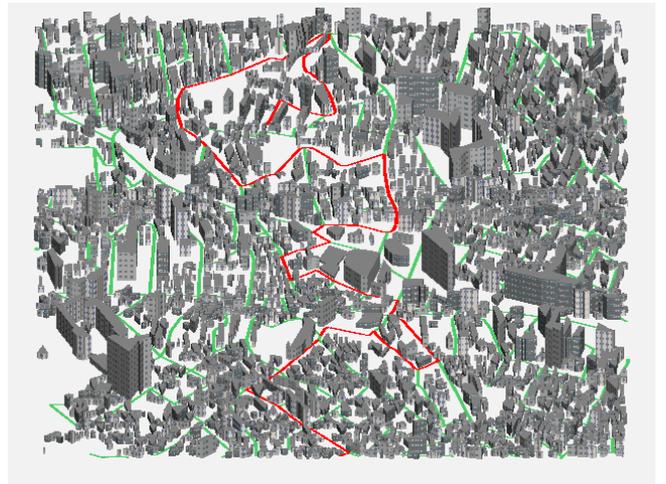
- ZmapTownII シリーズ (株式会社ゼンリン提供)
- 全国デジタル道路地図 DB (住友電設株式会社提供)

## 参考文献

- [1] J. Cui, P. Rosen, V. Popescu, and C. Hoffmann. A curved ray camera for handling occlusions through

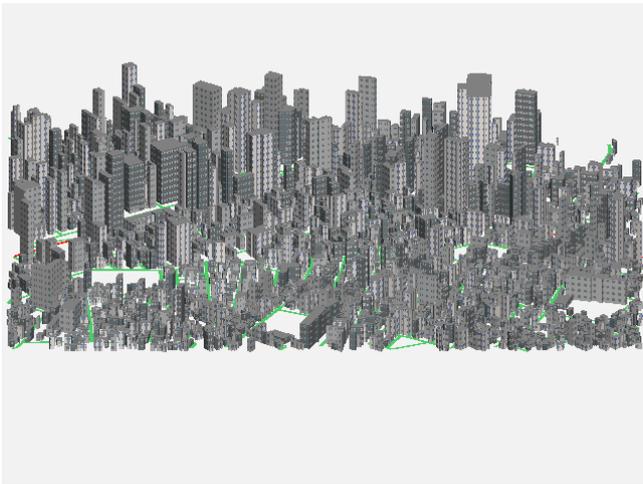


(a) 変形前

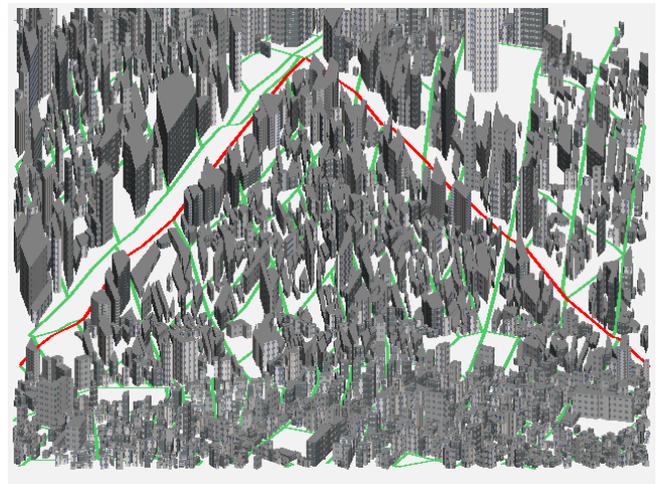


(b) 変形後 (2830ms)

図 6: 経路が曲線で構成されているもの (神奈川県横浜市鶴見区)



(a) 変形前



(b) 変形後 (1815ms)

図 7: 経路が高い建物の後ろにあるもの (神奈川県川崎市川崎区)

continuous multiperspective visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 6, pp. 1235–1242, 2010.

[2] P. Degener and R. Klein. A variational approach for automatic generation of panoramic maps. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, No. 1, pp. 1–14, 2009.

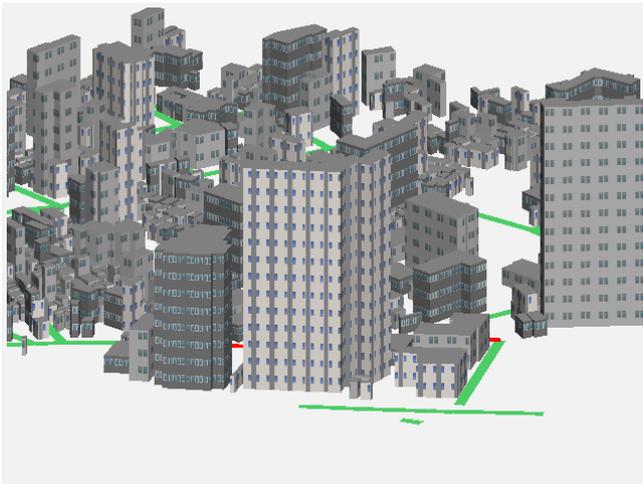
[3] F. Grabler, M. Agrawala, R. W. Sumner, and M. Pauly. Automatic generation of tourist maps. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 3, 2008. Article No. 100.

[4] S. Möser, P. Degener, R. Wahl, and R. Klein. Context aware terrain visualization for wayfinding and navigation. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics 2008)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1853–1860, 2008.

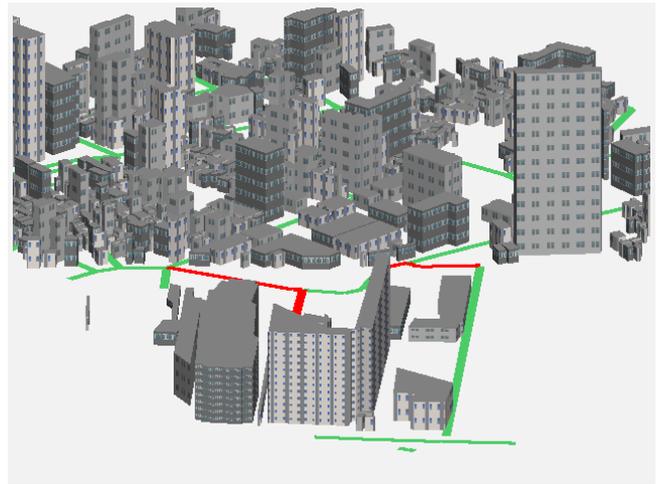
[5] M. Nöllenburg and A. Wolff. Drawing and labeling high-quality metro maps by mixed-integer programming. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, pp. 626–641, 2011.

[6] H. Qu, H. Wang, W. Cui, Y. Wu, and M.-Y. Chan. Focus+context route zooming and information overlay in 3d urban environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 15, No. 6, pp. 1547–1554, 2009.

[7] S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shimada, and T. Nishita. Occlusion-free animation of driving routes for car navigation systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 5, pp. 1141–1148, 2006.



(a) 変形前



(b) 変形後 (335ms)

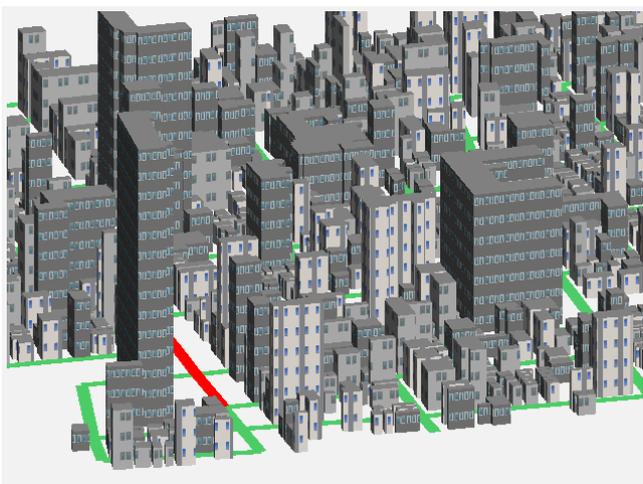


(c) 変形前-遮蔽領域が少ない場合

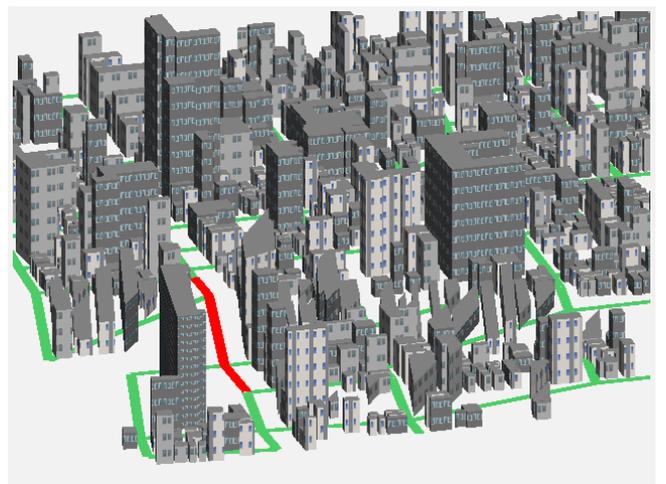


(d) 変形後-遮蔽領域が少ない場合 (261ms)

図 8: 建物が弧状のもの (東京都大田区)



(a) 変形前



(b) 変形後 (349ms)

図 9: 建物が経路の片側のみを隠しているもの (神奈川県川崎市川崎区)