

文化遺産防災のための道路モニタリングシステムにおける 監視カメラの効果的な配置計画に関する研究

A Study on the Effective Location Planning of the Monitoring Cameras for Road Monitoring
System for Cultural Heritage Disaster Mitigation

小川圭一¹・塚口博司²・安隆浩³

Keiichi Ogawa, Hiroshi Tsukaguchi and Yoongho Ahn

¹ 立命館大学准教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Ritsumeikan University

² 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Ritsumeikan University

³ 立命館大学研究員 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Post Doctoral Fellow, Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

Road monitoring system is one of the effective systems for cultural heritage disaster mitigation in historical cities. In this research, the effects of road monitoring system for cultural heritage disaster mitigation are estimated. The objective area is the central area of Kyoto City, which is a typical historical city in Japan. The effective location planning of the monitoring cameras is considered based on the locations of cultural heritage and the characteristics of road network. Genetic algorithm is applied to solve the problem. It is shown that the effect of road monitoring system becomes high by the optimization of the location planning of the monitoring cameras using genetic algorithm.

Key Words: road monitoring system, location planning, genetic algorithm

1. はじめに

京都市は多数の文化遺産や歴史的な街並みを有する歴史都市であり、それらを観光資源とした観光都市でもある。しかしながら、周辺には多数の活断層が存在しており、近い将来に大規模な地震災害が起こる可能性が大きい。歴史都市の市街地には古くからの木造建造物が多く、かつ狭幅員の細街路や袋小路など、道路ネットワークの面でも脆弱性を抱える地区が多く存在する。このため、震災時には市街地に多くの被害が発生するとともに、沿道建造物の倒壊や路面の損傷による道路閉塞によって緊急車両の通行にも支障をきたす可能性が存在する。歴史都市においては多数の文化遺産が市街地の中に点在しているため、文化遺産やその周辺地区で火災が発生した場合にも十分な消火活動がおこなえない可能性がある。

文化遺産の消失は歴史的、文化的価値の損失にとどまらず、観光都市である京都市の経済にも大きく影響すると考えられる。年間約 5,000 万人の観光客が訪れる京都市にとって、主要な観光資源の 1 つである文化遺産や歴史的な街並みが消失してしまった場合、経済的な損失も大きいと考えられる。このため、歴史都市においては一般的な市街地防災に加えて文化遺産防災についても考えることが必要である。

木造建造物の多い日本の歴史都市における文化遺産防災においては、火災による焼失を防ぐことが重要であると考えられる。このためには、個々の文化遺産における消火設備の設置などをおこなうとともに、震災時にもできるだけ道路ネットワークの機能を維持し、最寄りの消防施設から文化遺産周辺地区までの到達可

能性を向上することが必要である。そのための方法として、1 つは市街地内の道路リンクの拡幅や沿道建造物の耐震化・不燃化などにより、震災時における道路閉塞の可能性を減少させることが考えられる。しかしながら、歴史都市においては市街地内の伝統的な街並みそのものに歴史的、文化的価値が存在し、かつ観光資源にもなっていることから、そのような街並みの大きな改変をとまなう道路整備は困難であることが多い。そのため、既存の街並みを大きく改変することなく震災時の道路ネットワークの機能を向上する方法として、震災時に道路リンクの閉塞状況を監視し、緊急車両を適切に誘導するための道路モニタリングシステムを構築することが考えられる。

筆者らはこれまで、京都市の道路ネットワークを対象に、消防施設と文化遺産とを連結する重要道路リンクの抽出と、それにもとづく道路モニタリングシステムの提案をおこなってきた¹⁻⁴⁾。既存研究においては抽出したすべての重要道路リンクに監視カメラを設置するものと仮定して道路モニタリングシステムの整備効果を検討してきたが、整備に要する時間・費用や情報の管理・伝達といった面を考えると、すべての重要道路リンクに監視カメラを設置することは困難であると考えられる。そのため、より少数の設置箇所により大きな整備効果を得るための監視カメラの設置箇所の選定をおこなうことが必要となる。

このような監視カメラの設置箇所の選定は、整備効果の向上を目的関数とした組み合わせ最適化問題の 1 種と考えることができる。そこで本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いてこの問題を解くことにより、震災時の消防車両の到達可能率を向上するための監視カメラの配置計画をおこなう。具体的には、京都市上京区の道路ネットワークを対象にこの方法の適用をおこない、監視カメラの配置計画と、そのときの整備効果の比較をおこなう。

2. 遺伝的アルゴリズムの概要と道路モニタリングシステムに対する適用

(1) 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズム (GA) とは、ある範囲内で定義されている変数 x の関数 $f(x)$ の最大値または最小値を与える x の値を、高速に求めるための最適化アルゴリズムの 1 種である⁵⁾。

GA では、探索空間中の探索点を 1 点ずつ順に探索するのではなく、複数個の探索点を同時に探索する。このとき、各探索点 x を遺伝子をもつ仮想的な生物の個体であるとみなし、各個体に対する関数 $f(x)$ の値を環境との適応度として算定する。複数個の個体の中からより小さい適応度をもつ個体を淘汰し、より大きい適応度をもつ個体を増殖させることにより、生物進化の過程を模倣した世代交代シミュレーションを実行する。このとき、実際の生物の世代交代において生ずる遺伝子の交差、突然変異と呼ばれる操作をおこなう。これらにより、最終的に生物進化の結果としてより大きい適応度をもつ個体が得られるため、これを解とするものである。

一般的な GA のアルゴリズムの概要を図 1 に示す。

GA はこのような手順で最適解の探索をおこなうため、必ずしも厳密な最適解が得られるという保証はないが、実用的な近似解を比較的高速に探索できる方法として多くの分野で用いられている。また上述のように探索点を離散的に探索する方法であるため、離散的な組み合わせ最適化問題の解法として有用な方法であるといえる。

なお、本研究のような道路ネットワークを対象とした計画問題に対する GA の適用事例としては、たとえば道路ネットワーク上の交通量配分問題への適用、交通安全対策の組み合わせ最適化問題への適用、冬季の道路除雪計画問題への適用、都市内道路における混雑料金設定問題への適用、都市高速道

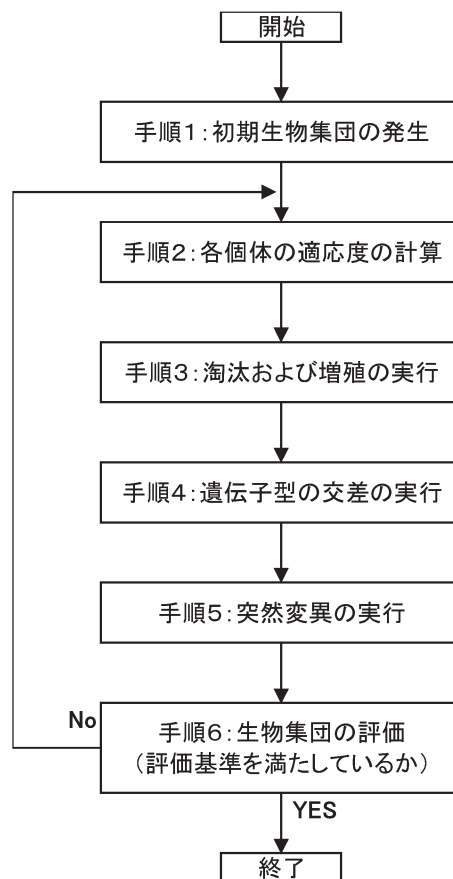


図 1 GA のアルゴリズムの概要

路の渋滞シミュレーションモデルの各種パラメータ設定問題への適用など、さまざまな研究がおこなわれている⁶⁻¹⁰⁾。これらはいずれも非線形の最適化問題となる道路ネットワークを対象とした計画問題の解法として GA を適用したものであり、解析的な最適解を求めることが困難な問題に対して実用的な近似解を求める方法として適用がなされている。

本研究は、これを震災時の消防施設・文化遺産間の到達可能率を向上するための道路ネットワーク上の監視カメラの配置計画に適用するものであり、道路ネットワークを対象とした組み合わせ最適化問題としての基本的な枠組みは上記の既存研究と同様である。しかしながら、目的関数を震災時に想定される消防施設・文化遺産間の到達可能率とし、監視カメラの設置箇所と複数の消防施設・文化遺産間の到達可能率との関係をもとに最適化をおこなっている点が特徴であるといえる。

(2) 道路モニタリングシステムに対する適用

本研究では GA を用いて、道路モニタリングシステムにおける監視カメラの設置箇所の選定をおこなうこととする。

震災時に想定される各道路リンクの通行可能率は、既存研究において阪神・淡路大震災時の道路閉塞状況のデータをもとに震度別、道路幅員別の通行可能率を算定したものを用いる^{11,12)}。また設置箇所の候補となる文化遺産防災のための重要道路リンクは、既存研究において京都市内の文化遺産の分布状況、消防施設の配置状況、現状の道路ネットワークの状況をもとに、文化遺産と最寄り3箇所の消防施設とを連結する経路に含まれる道路リンクとして抽出したものをを用いる¹⁾。いずれも詳細については参考文献を参照されたい。

各道路リンクの通行可能率は想定震度別、道路幅員別に設定されており、幅員の小さい道路リンクでは通行可能率が小さい値となっている。このため、消防施設と文化遺産とを連結する経路に幅員の小さい道路リンクが含まれている場合、道路閉塞によって消防車両が到達できない可能性が大きくなる。

これに対し、これらの重要道路リンクに監視カメラが設置され、道路閉塞の有無の情報が把握できた場合、消防車両を迂回経路に誘導することによって文化遺産までの到達可能率を向上することが可能である。もちろん、すべての道路リンクに監視カメラを設置することができれば到達可能率を最大化することが可能であるが、現実的には整備に要する時間・費用や情報の管理・伝達といった面から困難であり、より少数の設置箇所により大きな整備効果を実現することが求められる。到達可能率は監視カメラの設置箇所によって異なってくることから、この問題は監視カメラの設置箇所を変数とし、到達可能率を目的関数とする組み合わせ最適化問題として捉えることができる。したがって、上述の GA を利用して解を求めることが可能である。

なお、到達可能率が最大となる設置箇所の組み合わせの抽出は、考えられるすべての設置箇所の組み合わせによる到達可能率を算定し、相互に比較することによっても可能ではある。しかしながら、たとえば設置箇所の候補となる重要道路リンクが100箇所あり、そのうち10箇所に監視カメラを設置することを考えると、その組み合わせは ${}_{100}C_{10}=1.731 \times 10^{13}$ 種類となる。現実的な歴史都市における重要道路リンクの数はさらに多数となることから、すべての組み合わせに対して到達可能率を算定し、比較するためには膨大な時間を要してしまう。この点からも、近似解法としての GA を用いることが有効であると考えられる。

3. 京都市上京区における道路モニタリングシステムの検討

(1) 京都市上京区における適用方法

本章では、歴史都市である京都市の中でも多数の文化遺産が存在し、かつ京都市の特徴である格子状の道路ネットワークを有する上京区を対象として、GAを利用した監視カメラの配置計画の検討をおこなう。

上京区には65件の国宝・国指定重要文化財を有する文化遺産所在地が存在している。なお、本研究では文化遺産を所在地ごとに分類し、1箇所の所在地で複数の国宝・国指定重要文化財を有している場合であっても1件とみなして分析をおこなっている。また、上京区全体の道路延長における幅員4m未満の道路の割合は約43%、幅員4m以上6m未満の道路の割合は約24%と、幅員の小さな道路リンクが多く存在している。上述の文化遺産所在地についても、5件が幅員4m未満の道路リンクに面しているなど、幹線道路以外の幅員の小さな道路リンクに面した文化遺産が多く存在している。

前章で示したように、監視カメラの配置計画を検討する上での目的関数を、消防施設・文化遺産間の到達可能率とする。ただし、1件の文化遺産に対して複数の消防施設からの到達可能性を考慮するため、各文化

遺産に対して最寄り 3 箇所の消防施設からの到達可能率を対象とし、その平均値を用いることとする。対象地区内には 65 件の文化遺産が存在するため、消防車両の出発地・目的地となる消防施設・文化遺産の組み合わせとしては 195 種類となる。具体的な到達可能率の算定においては、震度 6 の地震を想定した各道路リンクの通行可能率をもとにランダムに 100 種類の道路閉塞状況が発生させ、消防施設・文化遺産間の到達可能性を判定することにより、各々の消防施設・文化遺産間の到達可能率を算定している。すなわち、全体で文化遺産 65 箇所×消防施設 3 箇所×道路閉塞状況 100 種類=19,500 種類の到達可能性を判定し、対象地区全体の到達可能率を算定していることになる。

対象地区の道路ネットワークと文化遺産の分布状況、消防施設の配置状況を図 2 に示す。

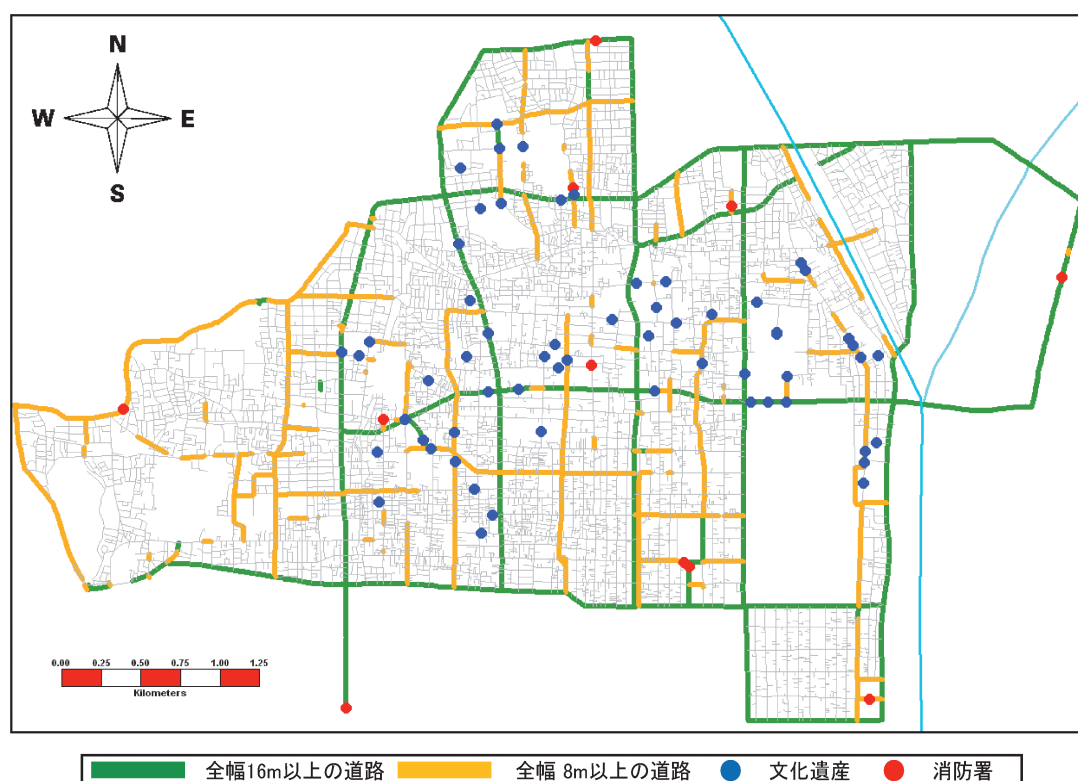


図 2 対象地区の道路ネットワークと文化遺産の分布状況・消防施設の配置状況

なお、既存研究における重要道路リンクの抽出方法、消防車両の誘導方法には複数の方法があるが、ここでは重要道路リンクとして、最短経路をもとに抽出した重要道路リンク、通行可能率のもっとも大きくなる経路をもとに抽出した重要道路リンクの両者を対象とする¹⁾。また消防車両の誘導方法としては、通行可能率のもっとも大きくなる経路に消防車両を誘導する方法を対象とする。これは、消防施設・文化遺産間の到達可能率の向上を図るためには設置箇所の候補となる重要道路リンクはより多い方が良くと考えられることと、監視カメラによる情報が得られた段階ではその条件下でのもっとも到達可能率の大きい経路に誘導することが望ましいと考えられることによる。

監視カメラの設置箇所数は、抽出された重要道路リンクの 20%、50%、80%の 3 段階の設置率に応じたものとし、GA を用いた設置箇所の組み合わせ最適化をおこなう。また比較対象として、既存研究で効果が大きいと予想された、通行可能率が小さい重要道路リンクから優先して設置した場合の到達可能率についても算定する。また、監視カメラをまったく設置しない場合（設置率 0%）、すべての重要道路リンクに監視カメラを設置する場合（設置率 100%）の到達可能率についても算定をおこなう。すなわち、以下の 8 ケースについて監視カメラの配置をおこない、到達可能率の算定をおこなうこととなる。

- ① 設置率 0%（監視カメラをまったく設置しない）
- ② 設置率 20%（通行可能率が小さい重要道路リンクに監視カメラを設置する）
- ③ 設置率 20%（GA により抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置する）
- ④ 設置率 50%（通行可能率が小さい重要道路リンクに監視カメラを設置する）

- ⑤ 設置率 50% (GA により抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置する)
- ⑥ 設置率 80% (通行可能率が小さい重要道路リンクに監視カメラを設置する)
- ⑦ 設置率 80% (GA により抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置する)
- ⑧ 設置率 100% (すべての重要道路リンクに監視カメラを設置する)

(2) 京都市上京区における適用結果と考察

上述の 8 ケースについての算定結果を表 1 および図 3 に示す。

表 1 各ケースの到達可能率の算定結果

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
監視カメラの設置率	0%	20%	20%	50%	50%	80%	80%	100%
道路閉塞の情報が得られなかった経路の数	19,500	13,577	16,694	11,810	11,796	11,547	11,547	11,547
道路閉塞に遭遇した経路の数	14,720	5,920	8,822	3,409	3,334	2,723	2,723	2,653
道路閉塞の情報が得られなかったが道路閉塞に遭遇した経路の割合	75.5%	43.6%	52.9%	28.9%	28.3%	23.6%	23.6%	23.0%
到達可能率	24.5%	39.3%	40.4%	43.1%	43.4%	45.3%	45.3%	45.6%

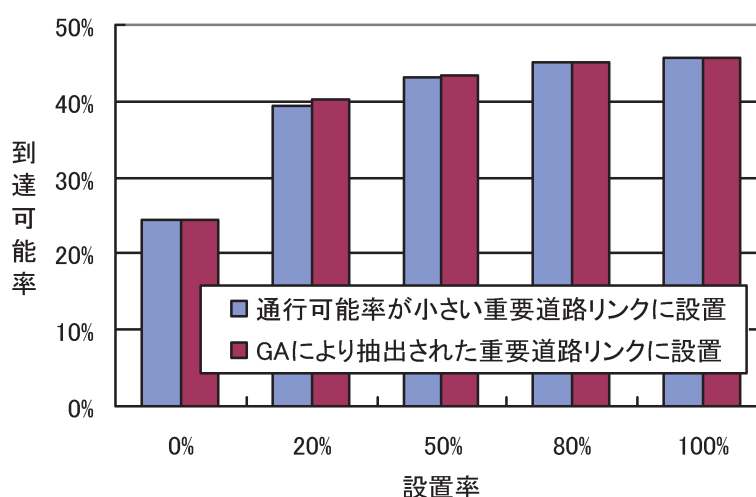


図 3 各ケースの到達可能率の算定結果

ここでは各ケースについて、文化遺産 65 箇所×消防施設 3 箇所×道路閉塞状況 100 種類＝19,500 種類の経路に対する到達可能性を判定している。このうち「道路閉塞の情報が得られなかった経路の数」とは、19,500 種類のうち監視カメラから得られた情報により道路閉塞が把握されなかった場合の数である。すなわち、監視カメラが設置されていない場合には何も情報が得られないため、すべての経路について道路閉塞の情報が得られないことになる。また監視カメラの設置率が大きくなるにともない、道路閉塞の情報が把握される場合も多くなるため、到達可能と判断される経路数が少なくなることになる。

監視カメラによって道路閉塞の情報が得られた場合、消防車両は閉塞された道路リンクを除いた道路ネットワークの中から通行可能率をもっとも大きくなる経路に誘導されることとする。この条件で「道路閉塞に遭遇した経路の数」とは、誘導された経路において、監視カメラが設置されていない道路リンクにおける道路閉塞に遭遇した場合の数である。監視カメラの設置率が大きくなるにともない、より多数の道路閉塞の情報を得ることができ、その道路リンクを避けた経路誘導をおこなうため、誘導された経路において道路閉塞に遭遇する場合の数が少なくなることになる。

これらをもとに「道路閉塞の情報が得られなかった経路の数」に対する「道路閉塞に遭遇した経路の数」の割合をとったものを「道路閉塞の情報が得られなかったが道路閉塞に遭遇した経路の割合」として示している。また、すべての経路 (19,500 種類) に対し、道路閉塞に遭遇することなく文化遺産に到達できる経路の割合を「到達可能率」として示している。当然ながら、監視カメラの設置率が大きくなるにともない、

前者の値は小さく、後者の値は大きくなることになる。

表1および図3をみると、当然ながら監視カメラの設置率が大きくなるにともない、到達可能率も向上していることがわかる。また、同じ設置率での2種類のケースを比較すると、設置率が20%、50%の場合にはGAを用いて設置箇所の最適化をおこなうことにより到達可能率が向上しているが、設置率が80%の場合には両者の到達可能率の差がないという結果となった。これは、設置率が小さい場合には両方で監視カメラの設置箇所が異なる場合が多く、設置箇所の最適化をおこなうことによって到達可能率を向上する余地があるためであると考えられる。逆に設置率が大きい場合には、必要とされる重要道路リンクには両者とも監視カメラが設置されているため、設置箇所の最適化をおこなってもあまり到達可能率を向上する余地がない状況にあると考えられる。

また監視カメラの設置率による到達可能率の違いをみると、到達可能率は監視カメラの設置率に比例して向上するわけではなく、より設置率が小さい場合の方が到達可能率の向上幅が大きいことがわかる。これらにより、効果的な監視カメラの配置をおこなうことにより、少数の監視カメラであってもより大きな効果を得ることができるものと考えられる。

具体的な監視カメラの設置箇所として、設置率が20%の場合における、通行可能率が小さい重要道路リンクから優先して設置した場合（ケース②）とGAにより抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置した場合（ケース③）の監視カメラの設置箇所を、図4、図5にそれぞれ示す。いずれも、着色された道路リンクが監視カメラの設置箇所である。

これをみると、通行可能率が小さい重要道路リンクから優先して設置した場合には、一部の連続した道路リンクに集中して監視カメラを設置する傾向にあるが、GAにより抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置した場合には、対象地域内のさまざまな位置の道路リンクに分散して監視カメラを設置する傾向にあることがわかる。これは、通行可能率が小さい重要道路リンクから優先して設置した場合には、幅員の小さい道路リンクに監視カメラを設置することになるため、一部の連続した道路リンクに集中して監視カメラを設置することになるが、その場合には、その道路リンクを使用した経路に関する情報を得ることができても、代替経路に関する情報を得ることができないため、必ずしも到達可能率の向上に結び付かない場合があるためではないかと考えられる。

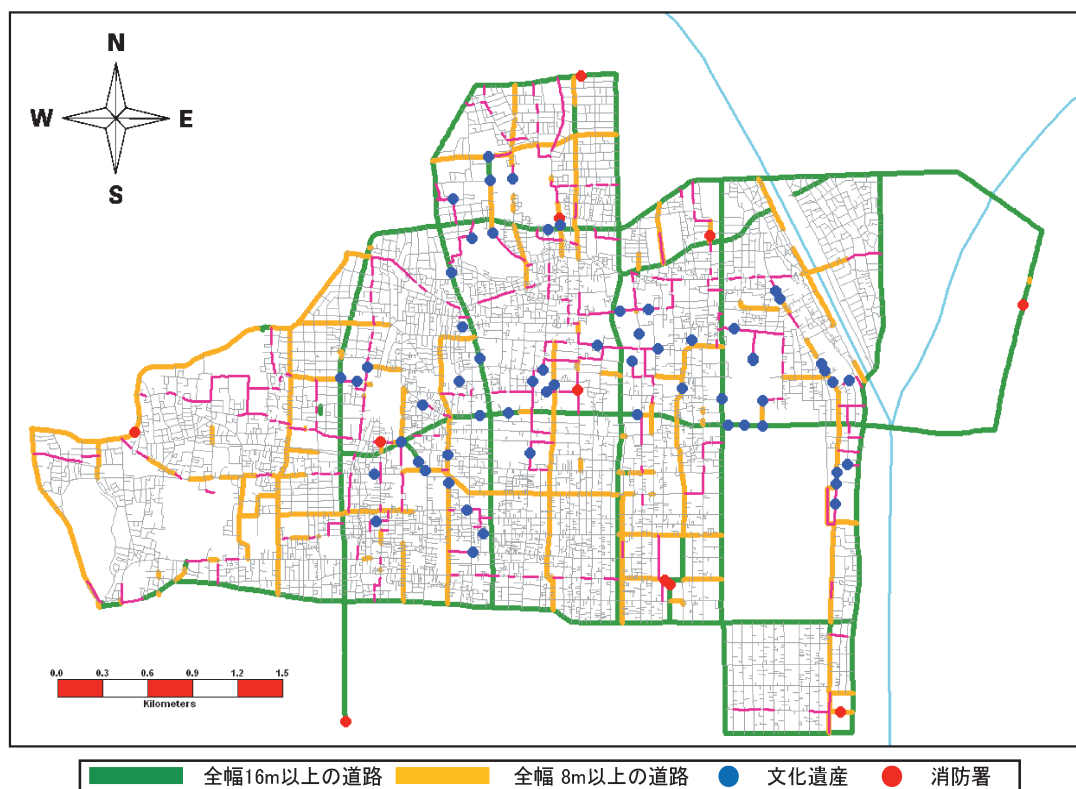


図4 通行可能率が小さい重要道路リンクから優先して設置した場合の監視カメラの設置箇所

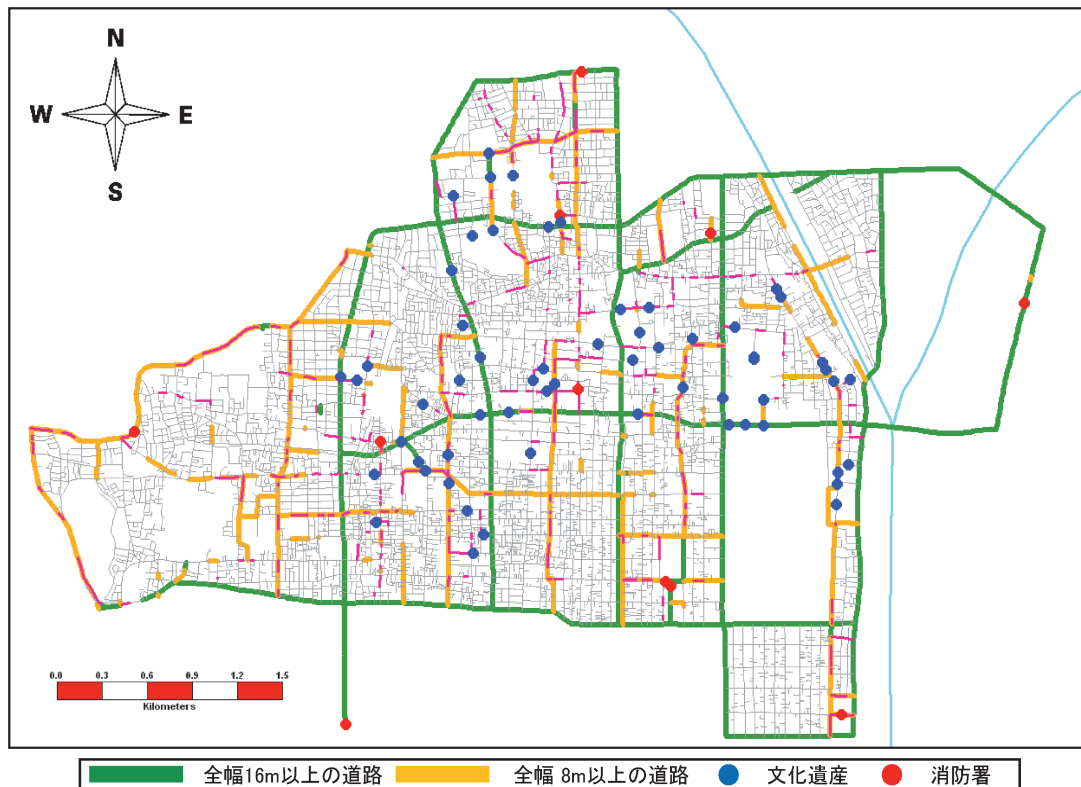


図5 GAにより抽出された重要道路リンクに監視カメラを設置した場合の監視カメラの設置箇所

4. おわりに

本研究では、文化遺産防災のための道路モニタリングシステムに対し、GAを用いて監視カメラの配置計画をおこなう考え方について提案し、京都市上京区の道路ネットワークを対象に適用をおこなった。

これにより、監視カメラの設置率が大きくなるにともない到達可能率も向上すること、また監視カメラの設置率が同じ場合には、設置率が小さい場合には設置箇所の最適化をおこなうことによって到達可能率を向上する余地があるが、設置率が大きい場合には設置箇所の最適化をおこなってもあまり到達可能率を向上する余地がないことがわかった。これらにより、効果的な監視カメラの配置をおこなうことにより、少数の監視カメラであってもより大きな効果を得ることができることが示された。

今後の課題としては、本研究では最寄り3箇所の消防施設からの到達可能率の平均値を向上させるような配置計画をおこなったが、たとえば到達可能率の最大値を向上させるような配置計画や、最寄り3箇所の消防施設の少なくとも1箇所から到達できる確率を向上させるような配置計画をおこなうことも考えられる。また、各々の文化遺産における初期消火設備の能力には限界があることから、到達可能率のみの向上ではなく、消防施設からの距離や到達時間を考慮した検討をおこなうことも必要と考えられる。

謝辞：本研究の遂行に当たっては、立命館大学理工学部学生 西田聖一郎氏（現：富士通株式会社 勤務）、立命館大学大学院理工学研究科学生 中村真幸氏（現：西日本高速道路株式会社 勤務）のご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小川圭一，塚口博司，中村真幸，本郷伸和：歴史都市における文化遺産防災のための重要道路区間の抽出に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.23, No.2, pp.253-264, 2006.9.
- 2) 中村真幸，塚口博司，小川圭一，本郷伸和，山内健次，東郷真也：文化遺産防災における重要道路区間の抽出と道路モニタリングシステムに関する一考察，土木計画学研究・講演集，Vol.32, CD-ROM, No.39, 2005.12.
- 3) 林雄一，塚口博司，小川圭一，中村真幸：文化遺産の防災性向上のための道路モニタリングシステムに関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.34, CD-ROM, No.70, 2006.12.

- 4) 林雄一，塚口博司，小川圭一：文化遺産の防災性向上のための道路モニタリングシステムに関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.37, CD-ROM, No.273, 2008.6.
- 5) 安居院猛，長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，昭晃堂，1993.9.
- 6) 安田幸司，秋山孝正：遺伝的アルゴリズムを用いた交通量配分法の一考察，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，第IV部門，pp.352-353, 1996.9.
- 7) 秋山孝正，鈴木崇児，笠原哲哉：遺伝的アルゴリズムによる幹線道路網の交通安全対策立案モデル，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，第IV部門，pp.430-431, 1996.9.
- 8) 有村幹治，上西和弘，杉本博之，田村亨：最適除雪道路選択モデルに関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.16, pp.387-392, 1999.9.
- 9) 野杻貴博，秋山孝正：遺伝的アルゴリズムによる道路都市網ゾーン別混雑料金の設定，土木計画学研究・論文集，Vol.18, No.3, pp.455-462, 2001.9.
- 10) 小川圭一，秋山孝正：遺伝的アルゴリズムを用いた渋滞シミュレーションの実証的構造設定方法，土木計画学研究・論文集，Vol.18, No.4, pp.737-746, 2001.9.
- 11) 塚口博司，小川圭一，本郷伸和：大震災時における道路の通行可能確率の推定，歴史都市防災論文集，Vol.2, pp.43-48, 2008.10.
- 12) 塚口博司，小川圭一，田中耕太，本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定，歴史都市防災論文集，Vol.3, pp.253-258, 2009.6.