

## 移動体との協調センシングによる知動化空間の構築

藤野 陽三<sup>1</sup>, 水野 裕介<sup>1</sup>, 田中 健一<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻

<sup>2</sup> 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

センシングによって状況を「知」り、人間を含む能「動」的アクチュエーションによって現実空間にフィードバックする「知動化」技術体系構想により、セキュアな公的空間を実現する。具体的には、空間内の人間や車両などの「移動体」に高精度測位、バイタルセンサ等を持たせ、高いセンシング・アクチュエーション機能が発揮できるようにさせる。それと環境側のセンサネットワークとを柔軟に協調させることで、安全状態に関する情報を効率的に取得するとともに、異常事態発生時には迅速な対応へ、常時においては事故や災害の有効な防止にフィードバックさせることで、安全な空間を実現する。

## Collaborative Sensing of Mobile Agents for Intelligent Mobilized Space

Yozo Fujino<sup>1</sup>, Yusuke Mizuno<sup>1</sup> and Ken-ichi Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

A technical concept “Intelligent Mobilized Space” has been proposed in order to make public space more secure by understanding the environments through sensors and activating agents to provide physical feedback to the real world and some details of the concept are explained. The mobile agents consist of automobiles, train vehicles and people equipped with location sensing systems, various sensors and communication devices. They detect faults and disorders by collaborating with sensors embedded in the environment as well as other agents, and respond physically for disaster relieves and preventions.

### 1. はじめに

安全安心の向上は大きな国家的な課題である。私的な空間の安全や健康管理などの個人的問題に対しては、受益者や対象が明確であり、センシングや情報技術の実装に関する研究開発が活発である。それに対し

て、人間活動のかなりの割合を占める公的空間は、対象空間が極めて広く、不特定多数が相手であり、かつ事象も事故・火災・犯罪・地震・テロなど多種多様であるため、問題は桁違いに複雑である。

人間活動という観点から公的空間を考えた場合、駅・オフィスや商業施設等の滞留

する空間(ノード)と、それらを結ぶ車や列車等の通過する空間(リンク)からなるネットワーク構造と見ることができる。古い地下街と最新鋭のオフィスビルとを比べるまでも無く、各種ノードやリンクにおけるリスク間には大きな差があり、また、健常者と弱者でもリスクが異なるのが実態である。それらを一様なレベルとし、格差の無い安全性を提供することが安全で安心な社会の究極の目標である。しかし、警察や消防などの組織や体制に一方的に頼る安全安心システムの充実拡大は社会的負担が大きすぎる。そのため、公的空間における安心・安全な環境を確保するための技術の実現が社会的な急務となっている。

これに対し本研究では、著者らが提唱する、センシングによって状況を「知」り、人間を含む能「動」的アクチュエーションによって現実空間にフィードバックするという図-1に示す「知動化」構想にもとづき、人間や車両などの移動体を軸としたセンサ・アクチュエータ・ネットワークにより安心・安全な「知動化セキュア空間」<sup>[1],[2]</sup>の実現を目指す。

## 2. センシングシステムの動向と課題

### (1) センサネットワークによる情報収集

大規模かつ多量のデータを収集するセンサネットワークに関する研究が大きく進展しつつあり、ハードウェアについては、小型化・省エネルギー化・低コスト化が大きく進展している。それにより、従来、事実上不可能であった高密度・高解像度の計測が実現されることで、状況に応じたきめ細かな計測と対応が可能となり、環境・安全・農業その他、空間的な情報の取り扱いが重要である諸分野にブレークスルーをもたらすものと期待されている。また、センサネットワークとアドホックネットワーク技術



図-1 知動化空間の概念

が連携することで、一部のセンサノードやネットワークが部分的に動作しない場合でもデータの伝送が可能となり、従来型の中央で情報を一括管理するネットワークに比べて、信頼性が向上するものと期待されている。しかしながら、従来のセンサネットワークに関する検討は、何らかの形でデータを中央で管理して状況把握することが暗黙の前提となっている。したがって、センサの数が増えることによる精度や解像度の向上が主たる関心であり、センサ数増加に伴う中央への情報伝達の信頼性低下をアドホックネットワーク技術で補うという研究コンセプトが主流である。このように、ハードウェアの飛躍的進歩に比して、情報処理法などのソフトウェアは従来手法の延長線上での発想に留まっていると言えよう。センサネットワークの特性を生かした、センサネットワークを「使いこなす」ためのソフトウェア面からのブレークスルーが強く求められる。

### (2) 公的空間におけるセンシング

現状の、公的空間の安全安心のためのシステムは、ノード部空間では、火災報知器や監視カメラなどの固定式センサの中央センターによる集中情報管理と関係者の危機管理対策マニュアルによる教育に頼っており、その機動性、迅速性などについては疑問が多い。リンク部空間については、鉄道

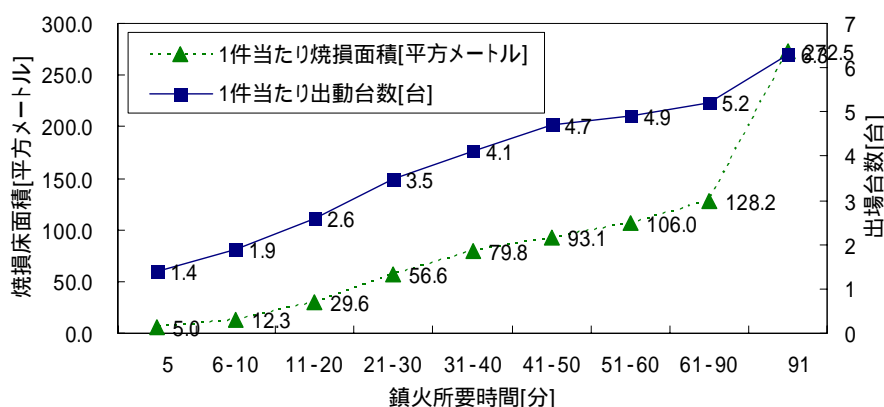


図-2 建物火災の鎮火所要時間別 1 件当たり焼損状況 [3]

主要幹線で運行安全制御に関する自動化が行われているが、軌道、橋梁やトンネルなどのインフラ部の検査間隔は数年のオーダーであり、事故・災害検知システムと車両とのオンラインによる連動は行われていない。ノード部、リンク部とも地震や火災などの面的大規模災害に対しては最近、センサなどによる情報収集と救助活動との体系化についての研究が始まりつつあるが、領域、対象災害が限定されており、多様な状況を踏まえた一体的かつきめの細かい防災・減災・救助体制についての研究はほとんど行われていない。

リンク部空間を対象とし施設の劣化を背景に、ヘルスマonitoring研究が進展しつつあるが、その多くは高度なセンサの高密度配置を前提として、微細な欠陥や損傷を検出するためのハードウェア開発や理論構築を意図している。これらは、従来の定常点検の合理化や長期的な予防保全の効率化には有用なものの、社会基盤施設における微細な亀裂などの損傷は、大事故に至るまでの猶予時間が一般に長く、緊急事態への対応には有効とは言えない。また、データのオフライン中央集中処理が暗黙裡に仮定されていることから、リアルタイム性が要求される緊急事態への適用は非効率かつ非現

実的である。

交通基盤施設での災害・事故は、地震災害のように面的なものであっても、ネットワーク全体から見れば局所的に発生する。よって被災の可能性のある車や列車などの移動体は、個々の災害・事故現場近傍に限定される。また、事中・事後の初動対応では外部支援を待っている被害が拡大する懸念があり、現場周辺の人員や資源のリアルタイムな有効活用が極めて重要である。しかるに、従来型の防災危機管理システムで見られる中央管理体制では、情報のやり取りや救助のための資源配置に手間や時間を要し、また地震のような同時面的災害時には情報集中によってむしろ効率が低下する。よって、現場中心のローカルな情報伝達を実現する、現場近傍での分散的な情報・資源管理の方策の研究が求められる。

### (3) アクチュエーションとの連携

上記で述べた既存のセンシングシステムは、情報の収集と現象に理解に注力し、その解釈による現実世界への物理的フィードバックが欠落している。現状の街頭カメラや種々のセンサによる異常検知の判断やその事象に対する対処は、マニュアル整備や施設管理者等の人間の裁量による部分が多い。そのため、初期対応や初動体制の迅

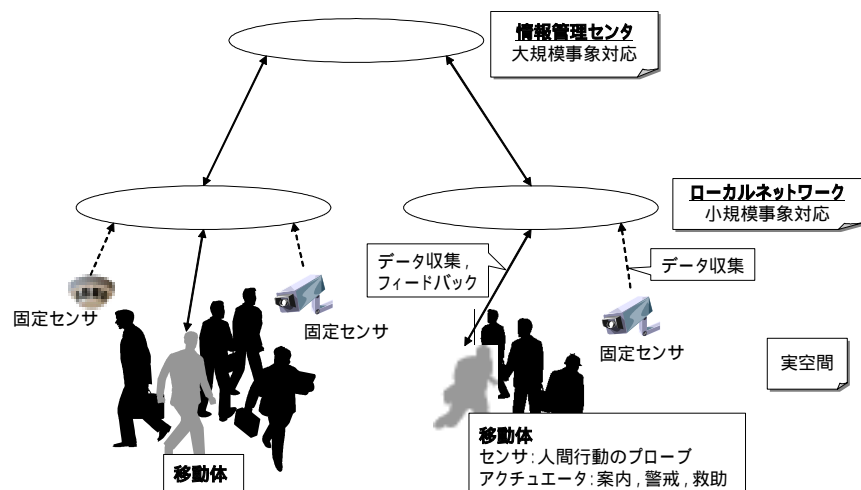


図-3 移動体（人間）による知動化

速化や効率化は非常に困難である。

図-2 は建物火災の鎮火所要時間とその影響を示したもので、所要時間の増加に伴い焼損床面積や消防車の出場台数が増加していることがわかる。これは短時間に火災を通報し、対策を講じることにより被害や対策コストを軽減できることを示すものである。このように異常事象を検出し、迅速に対応を開始しその対応までのタイムラグを以下に小さくするかがアクチュエーションの観点から非常に重要となる。特にセンシングからアクチュエーションまでの一連のプロセスを統合的に考慮し、アクチュエーションを迅速かつ効率的に行うためのセンシング、情報処理手法の開発が必要である。

### 3. 移動体としての人間による知動化

駅などのノードにおいて、移動体としての「人間」は危険をすばやく察知し、反応する優秀な多機能的「センサ」であり、また、ロボットよりも優れた多目的な「救助アクチュエータ」でもある。さらに、バイタルサインを援用することで、さらに危険感知能力を高めることができる。本研究では、これら「移動体」をセンサ・アクチュ

エータとして積極的に活用することで、現場における迅速で効率的な対応を実現する。現時点では、すべての個人にその役割を担わせることは無理であるが、駅や商業施設などのノードでは、従業員、ボランティアなど、センサ・アクチュエータの機能を付託可能な人が存在する。図-3 に示すようにこれらの移動体と環境センサを組み合わせたセンシングによって危険の検知・状況判断を行い、さらに、危険回避情報や救助行動をフィードバックするセンサ・アクチュエータ・ネットワークをアドホックかつ階層的に構築することによって、現場における迅速な対応と支援を実現する。

#### (1) 移動体の高精度測位

センサ・アクチュエータである移動体の効率的な展開を行うには、環境変動にロバストかつ時間/空間に連続した高精度測位を必要とする。天空が大きく開かれた場所の測位手段には従来の GPS が適しているが、都市渓谷や屋内では、高精度の測位ができない。また屋内測位の方式では、現在サービスされている携帯電話端末から複数基地局への電波到来時刻差から端末方位を求める方式の誤差は、おおよそ 100m である。また、RF-ID ベースの測位方式の開発が進められているが、おおよそ 10m の誤

差がある。

そこで、屋内外のシームレスな高精度測位技術の開発が不可欠である。具体的には、自律もしくは補助を受けて、高精度に位置を同定する端末技術と、その端末を補助する位置情報ネットワーク技術の開発が対象となる。

## (2) バイタルサインによる異常事象検出

空間の異常事象検出にはさまざまな手法が存在するが、本研究では移動体のバイタルサイン<sup>[4]</sup>に着目する。これまでバイタルサインは人間の健康状態のセンシングとして考えられてきたが、ここでは、人間のおかれた状況の異常性の検知に使うことを考える。移動体としての人間は、視覚、聴覚などの五感を通して空間を把握するが、それをすべてデータとして取得し処理することで異常を検知することは、災害などの即時性が求められる場合は現実的ではない。それに対し、心拍数、血流などのバイタルサインは移動体のストレスを反映しており、異常事象検出のスクリーニングに適している。従来的人物健康モニタ機器の開発・研究は日常生活を対象とし、心拍変動、身体活動の計測を行うセンサが主体であり、移動体として運動を伴うバイタルサイン計測は、体動ノイズの除去が課題である。

## (3) 緊急時の情報伝達とアクチュエーション

緊急対応においては、不確定な状況下であっても、行動を起こし始めることが被害の拡大を抑止する上で大切であり、時間の経過と共に詳しい状況が明らかになるにつれ、行動を修正しながら結果として準最適な行動が選ばれるようなフィードバックが望ましい。本研究では、移動体およびセンサネットワークから得られる大量の情報から、リアルタイムに準最適な対応を実現する情報伝達とフィードバックの設計法を研究する。移動体と協調したアドホック・セ

ンサ・ネットワークの利点を生かし、

- (i) 異常事態発生検知・初動段階では、隣接したセンサと移動体のローカルなネットワークで一次情報を共有化・解析し異常事態の有無と対応の要否の判断を迅速に行う。
- (ii) 次に、周囲の移動体およびセンサネットワークで情報を共有化。異常事態の規模を把握し、必要な支援規模について概略を判断。小規模事態や誤報であれば、このレベルで事態が終息する。
- (iii) さらに、センタで異常事態の質と規模を詳細に分析。追加支援や事後対策に反映。

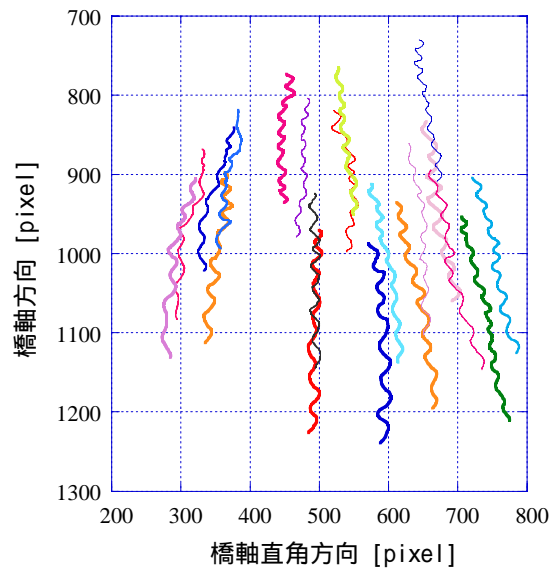
という、時間スケールとネットワーク規模が連携した階層的な情報伝達・フィードバック法を開発する。

## (4) 人物計測による行動把握と状況理解

人間の動きを追うことは行動把握にとり重要な課題であるが、一般人対象とする場合、センサの装着は期待できず、ビデオ画像が有力な手段となる。とくに公的空間では群集を構成する個々の人間をトレースする必要がある。図-4に示すのは橋の上を群集が歩いた場合の人の動きをトレースした例である

現在、空間内における人物の行動把握と状況理解を行うために、ある店舗においてカメラ、光電センサを複数設置し人物行動計測実験を行っている(図-5)。複数のカメラ、センサにより人物動線トラッキング、人物行動意味理解、顔認証に関する実データを用いた手法の開発およびその検証を目的とした。

人物動線トラッキングでは、複数のカメラ間で移動する人物の動線追跡アルゴリズム、光電センサを使った人物通過検出による画像センシングの補完手法の確立を行う。また、人物動線トラッキング情報を利用し、



(a) 橋の上を歩く群集

(b) 橋の上を歩く群集をトレースした例

図-4 画像解析による群集の歩行軌跡の把握

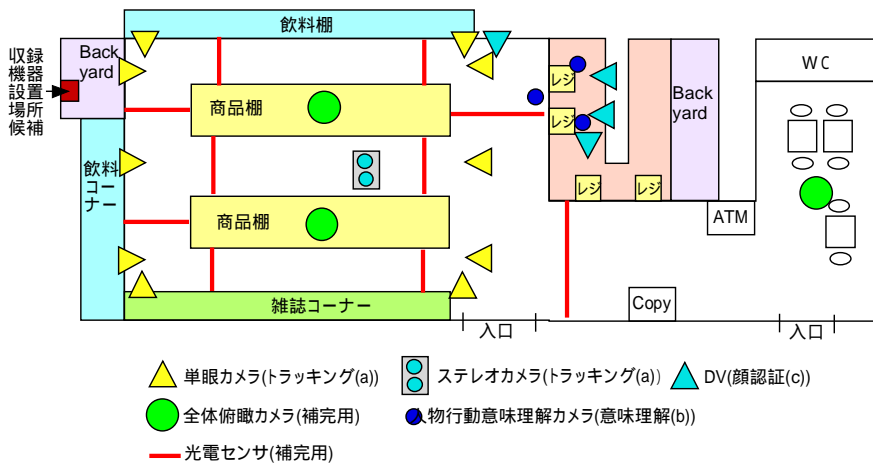


図-5 店舗における人物行動計測の例

マーケティングやセキュリティなどのアプリケーションにおける人物行動分析手法を構築し、空間内の施設配置に関するフィードバックを検討する。

人物行動意味理解では、カメラ画像で得られる人物の動作情報に基づき、人物行動の意味理解を行う基本手法に関する研究を行う。

顔認証では空間内の主要ポイントにおいて人物の顔画像検出を行い、顔認証技術のロバスト化手法に関する研究を行う。

#### 4. 施設と車両の協調センシングによる高度性能評価

本研究は、従来のヘルスマonitoringでは対応不可能であったリアルタイム性が要求される緊急事態に対して、施設ならびに移動体からなるセンサネットワークを開発し、オンラインの自律分散型アルゴリズムを構築してリアルタイムでの異常検知と通報を実現することにより、危機・被害の拡大を制御することを目指す。橋梁をはじめとする交通基盤施設では、緊急対応時に移

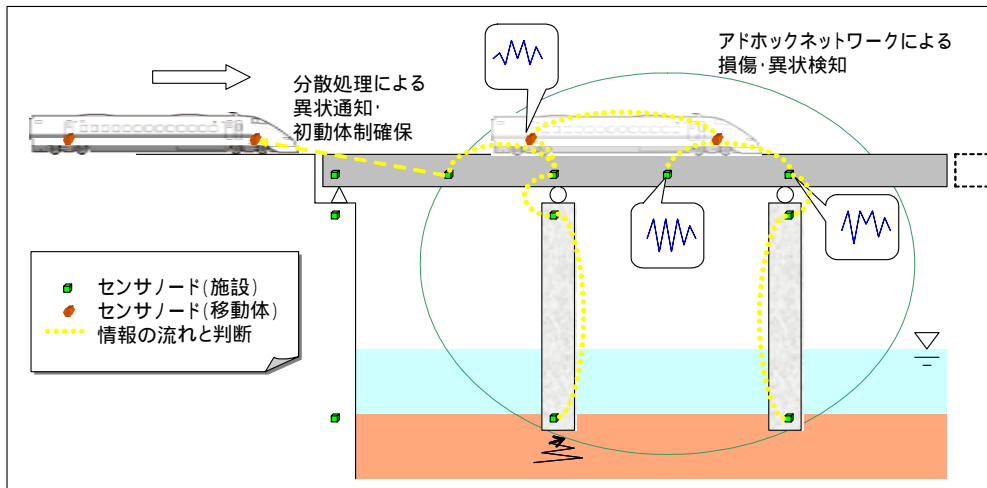


図-6 移動体と橋梁との連動センシングと危機制御

動体の運転規制などが必要で、高いレベルのリアルタイム性が求められる。また、移動体は構造物への主要な荷重の一つという一面も有する。そこで、従来型のヘルスマニタリングでは計測対象が施設に限られていたが、無線アドホックネットワークを用いることで、図-6 に示す移動体（車両）の応答と施設側の応答とを併せて分散処理するシステムを構築する。

### (1) 自律分散型センサネットワークシステムの構築

大事故・大災害の前兆を比較的数の少ないセンサで検知し、分散処理することにより対応速度を飛躍的に向上させた、危機管理、特に初動対応への適用も可能なオンライン危機制御システムを、アドホック通信可能なセンサネットワークを基盤として構築する<sup>[6]</sup>。既存のセンサノードでは、ヘルスマニタリングで求められるレベルの時間解像度の実現が困難であるため、改良を行いヘルスマニタリング用の実用性を高めたセンサノードを開発する。また、自律的分散処理を実現するための通信方式や演算処理方法についての検討を行う。

### (2) 大変状のリアルタイム異常検知のための分散型の性能評価理論の構築

振動応答の統計的評価にあたって、1) 移

動体のセンシングも可能となることから、システムへのインプットである荷重を含めた統計的な分析が可能となること、また、2) 移動体の載荷時の施設の応答、ならびに移動体の応答自体が性能を表していること、の2点に着目して性能評価を行う手法を構築する。

具体的には、各センサ自体の計測に加えて、移動体センサから荷重情報、および、施設系センサ相互間の相関などの特徴量をアドホックネットワーク化による自律的分散処理によって評価することで、変状の検知をローカルに行うことのできるアルゴリズムの構築を行う。特に、普段は表れない応答信号が変状によって発生したり、応答パターンが変化したりすることに着目して、パターン認識アルゴリズムを援用することで、迅速かつ限られた計測点数での異常検知法を確立する。

### (3) テストベッドにおけるシステムおよび理論の開発・検証

事故・災害時のモニタリングデータはその取得が極めて困難であることから、存在しないのが現状である。そこで、施設の劣化・損傷による大変状ならびに地震のような異常外乱による大変状の2つのモードを対象に、再現実験が可能なテストベッドを

作成し，システムやアルゴリズムの妥当性を検証する．

テストベッドは，自走して構造物に載荷可能な移動体部分と，高架橋構造からなる構造システム模型として，損傷時ならびに健全時の差は，一部模型部品を取り替えることによって実現する．また，アクチュエータで加振することで，地震時挙動を模擬できるものとする．

#### (4) 実橋における検証

実際の橋梁で，試験的に計測を行い，提案アルゴリズムならびにシステムの有効性を検証する．具体的には，鉄道橋を対象にフィールドを想定しており，速度や軸重の差による応答の差異を利用して，提案手法の有効性を主に統計的検知から検証するとともに，システムの実用性を評価検討する．

## 5. まとめ

知動化空間はセンサネットワーク関連の研究としても，1)センシングだけでなくアクチュエータを組み入れたネットワークを提案し，2)そのための要素として空間内に分散して存在する「移動体」を利用し，移動体としての人間がセンサとしても，また救助などのアクチュエータとしても振舞うことで，ネットワークの行動性，機能性を格段に向上させるという新しい概念を提示し，3)ノード部空間とリンク部空間の両方で統合的に，また協調的に機能する統合的なシステムの構築に挑戦している．本研究は，単に危険検知のみならず安全状態の制御を目指すものであり「ポストセンシング時代」を先取りした内容となっている．将来的には，本研究課題で開発する技術をもとに，自然な助け合いが誘発される「互助コミュニティ」創造につなげ，安全のみならず安心な社会への貢献を視野に入れている．

**謝辞** 本研究は，東京大学情報学環 佐藤洋一助教授，三菱電機 橋本学氏，鈴木直彦氏ほかとの共同研究の一部であり，メンバーとの討議，共同作業に深く感謝する．

## 参考文献

- [1] 藤野陽三：知動化社会基盤，戦略イニシアティブIRT ITとRTの融合，科学技術振興機構 研究開発戦略センター (JST/CRDS), pp.25, 48, 2005.
- [2] 藤野陽三：知動化セキュア空間（投稿準備中）
- [3] 総務省消防庁：平成 16 年版 消防白書，<http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h16/h16/index.html>
- [4] 牧川方昭：計測器を着る - 日常身体活動のモニタリング-，日本機械学会誌，106 巻，No.1014，2003 年 5 月
- [5] 藤野，吉田，杉山：群集の歩行により励起される橋梁の水平横振動の画像解析，人間工学会論文集（投稿中）
- [6] 藤野ほか：安全安心のためのセンサーネットワークにおける危険感知のための分散アルゴリズムに関する基礎的検討（投稿準備中）