

2

オリンピックにおける人の流れの解析

応
般

山下倫央 (産業技術総合研究所)

大西正輝 (産業技術総合研究所)

オリンピックにおける人の流れ

1964年10月10日に東京オリンピックの開会式が行われた国立霞ヶ丘陸上競技場(収容人数5万4,000人)は、2020年に開催される東京オリンピックのメイン会場・新国立競技場として改築され、収容人数が8万人になることが報告されている。また、現在の国立競技場はスポーツイベントだけではなく、コンサートや神宮外苑花火大会の会場としても利用されており、多くの人が集まる会場として利用されている。競技場までのアクセス方法は現在、都営大江戸線の国立競技場駅(徒歩1分)、JR総武線の千駄ヶ谷駅・信濃町駅(徒歩5分)、東京メトロ銀座線の外苑前駅(徒歩15分)と複数の路線があることから、大変便利ではあるものの、オリンピックの開会式や人気競技の開催時には相当な混雑が予想されている。

このような多くの人が利用する大型施設において、人の流れを解析することは、事前の混雑状況の検討や混雑緩和方策の検証、さらには災害時の避難誘導方法の立案など、安全にオリンピックを運営・開催するための重要な要素技術である。特にオリンピックではこれまでの大会に比べて土地や言語に不慣れた外国人が多くなることが予想されており、会場まで(から)の適切な誘導は混乱を起こさない、あるいは最小限にするためにも特に重要である。

このような大規模な人の流れを解析するためには人の流れを予測する技術、人の流れを計測する技術が必要であり、リアルタイムで混雑を解消するためには、人の流れを誘導する技術が必要である。本稿では、それらの要素技術を解説するとともに、適用事例としてロンドンオリンピック、霞ヶ丘陸上競技

場、オリンピックではないが多くの人が集まるイベントとして花火大会の3つの例をとりあげて紹介する。

要素技術

シミュレータによる人流予測

オリンピックや大規模なイベントでは、誘導の対象となる来場者が数万人に上る。そのため、円滑な人の流れを実現することができなければ、単に時間的損失をもたらすだけではなく、混雑による危険が生じてしまう。数万人規模の来場者を誘導する状況において、勘と経験に頼って誘導計画を事前評価することは困難であった。しかし、近年では人流シミュレータを用いることで、人の流れや群衆の波を可視化して、さらに来場者の誘導計画を移動時間や混雑密度といった観点から定量的に評価することが可能になってきている。

人流シミュレータは下記に挙げられるように、これまでに多くのシミュレータが開発されている。日本のエーアンドエー(株)は大型イベント等における空間計画や誘導計画、商業地における季節催事計画などへの利用を想定して歩行者シミュレーション SimTread を提案している^{☆1}。

イギリスの Legion International Limited は Legion Studio を開発しており、シドニーオリンピックやアテネオリンピックが開催されたスタジアム周辺の誘導方法の検証に用いている^{☆2}。

筆者らは大規模な群集流動に特化した高速計算が可能な群集流動シミュレータ CrowdWalk を提案し

☆1 エーアンドエー(株): SimTread.
<http://www.aanda.co.jp/products/simtread/index.html>

☆2 Legion International Limited: Legion Studio.
<http://www.legion.com/>

ており、花火大会の誘導計画や数万人規模の津波避難の誘導計画の立案支援に用いられている¹⁾。

これらのシミュレータは災害時の津波浸水データや火災延焼データと連携し、災害時の避難を対象として用いられることもある。

カメラによる人流計測

シミュレーションで人の流れを予測するためには、同時に人の流れを計測する技術が必要になる。人の流れを計測する方法としてはGPSなどのデバイスを人が持つ方法とカメラやレーザなど環境に設置されたデバイスを用いて計測する方法の2つが考えられる。ここでは公共空間においてオリンピックに参加する不特定多数の歩行者を計測することを考え、環境に設置したカメラを用いた人流計測に焦点を当てる。

カメラから得られる画像を用いて人の位置を検出する方法としてはHOG (Histogram of Oriented Gradients) などの画像の局所特徴量を求め、SVM (Support Vector Machine) などの統計的学習手法で検出する方法が数多く研究されており、文献3)に網羅的に紹介されている。これに加え、近年ではKinectなどの安価な3次元画像取得デバイスが発売されており、人の抽出を3次元空間上の点群のクラスタリング問題として捉え、これまでよりも飛躍的に高い精度で歩行者の位置を抽出できるようになってきている。

このような手法で抽出した人の流れの計測結果をシミュレーションで利用する方法は大きく以下の2つが考えられる。

- ①ある条件下での人の流れを計測・モデル化してシミュレーションを行う際のモデルパラメータとして利用する。
 - ②定常的に人の流れを計測して、リアルタイムシミュレーションの初期値などに利用する。
- ①に関しては、これまでも歩行群衆を観測する

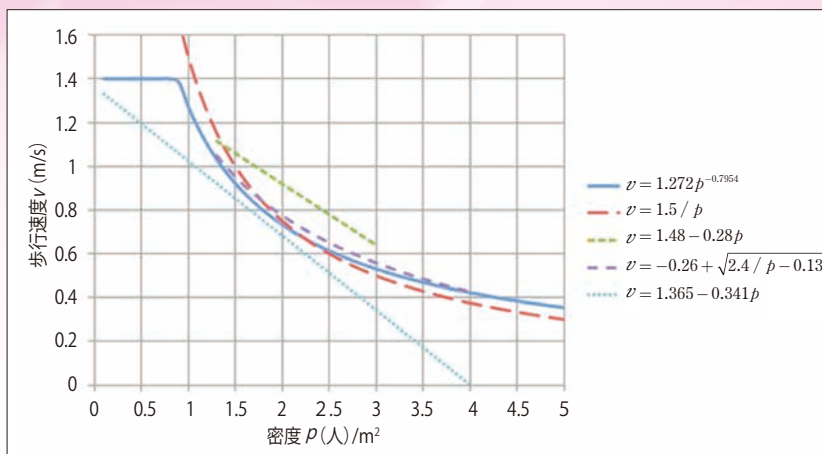


図-1 歩行者周辺の人の密度と歩行速度の関係

ことで人の流れの特性を求める研究が行われており、水平な道を一方に流れる状況において歩行者周辺の人の密度 (人/m²) と歩行速度 (m/s) の関係に関するいくつかのモデルが提案されている。その代表的なものを図-1に示す。これらの計測は水平な道だけではなく、階段や駅改札口、エスカレータなどへと拡張されており、さまざまなモデルが提案されている²⁾。また、②に関してはリアルタイム性と大規模性が必要となることから、筆者の知る限り、いまだ研究としても十分には行われていないが、正確に動作すればリアルタイムでの誘導や災害時の被害状況の推定などに効果があることは明白であり、今後研究が進んでいくものと思われる。その際にはシミュレーション結果と観測データを融合させるデータ同化 (Data assimilation) の技術も重要な研究要素となる。

多数の歩行者の映像を取得するインフラとしては防犯カメラが考えられる。少し古い資料になるが2006年に発表された“A Report on the Surveillance Society”によるとイギリス国内には420万台のCCTV (Closed-circuit Television) と呼ばれる監視カメラが設置されており、ロンドンで1日旅行をすると300回は監視カメラに映る計算になるといわれている。これらのインフラを活用することができれば大規模に人の流れを取得することができると考えられるが、これらの映像の研究利用はプライバシー保護の問題などから賛否両論あり、今後社会のコ

ンセンサスをどのように得ていくかに注意が必要である。特に日本は犯罪件数が少ない反面、地震や台風など自然災害が多い国であるため防犯カメラが果たす役割は防犯だけではなく、災害時の被害最小化などの減災への活用も期待されている。さらなる研究の発展に期待したい。

人の流れを誘導する技術

人の流れの分析結果や混雑状況をフィードバックするための従来手法として、館内放送のような音声案内が挙げられる。音声案内は多くの人に均一な情報を与える上では有効であるが、特定の位置の人に特定の情報を与えることができない。今後の情報配信の狙いとして、スマートフォンなどの携帯端末に対して、混雑情報や混雑状況を踏まえた移動経路といった動的な情報をリアルタイムに配信して、来場者を誘導することが考えられる。混雑状況のような動的な情報が容易に収集できれば、来場者に対する混雑状況の配信や混雑状況に基づく移動経路の提示といったサービスが普及する可能性があるため、情報配信技術と人流計測技術との連動が期待される。

また、大型電子掲示板やプロジェクションマッピングを用いて、特定の場所にいる来場者への情報配信も有用である。各来場者の属性や希望に合わせた情報提供は難しいが、来場者の集中による通信回線の輻輳に影響を受けずに多くの来場者に一度に情報配信が可能で、混雑状況での歩きスマホによる危険が生じないという利点がある。そのため、複数の情報配信方法が別々に機能するのではなく、大型電子掲示板やプロジェクションマッピングで混雑やイベントに関する大枠の情報を配信し、その情報に喚起された来場者が携帯端末を用いて詳細な混雑情報や経路情報を確認するといった仕組みが将来的には望まれる。

適用事例

ロンドンオリンピック

ロンドンオリンピックにおける人の流れのシミュ

レーションの適用事例を紹介する。

イギリスの Legion 社は人の流れを予測するシミュレータを開発している。ロンドン地下鉄構内の利用者動線やオリンピック会場の観客動線を推定することで空間の安全評価を行い、それらの結果はロンドン市消防局 (L.F.B) の防災計画にも利用されている。London's Transport Commissioner の Peter Hendy がロンドンオリンピック開催前の 2012 年 4 月に提出した報告書 “Hosting a great Games and keeping London moving this summer” と題した資料にはオリンピック期間中 (メディアセンターがオープンする 6 月下旬から聖火リレー、オリンピック、そして 9 月 14 日のパラリンピック終了まで) の道路や駅の混雑状況を詳細にシミュレーションした結果が掲載されている。その報告書には 30 分ごとの地下鉄の各駅での混雑度合い (待ち時間) や、道路における車や鉄道における人の混雑具合をシミュレーションしている (図-2)。この報告書では特にロンドン橋駅での人の混雑が激しいことが予想されており、近くのキャノン・ストリート駅やモニュメント駅から川を渡って 5 分間歩くことを奨励している。

また、これらの結果をもとにして混雑を緩和するための対策として地下鉄などの電車は 1 時間ほど遅くまで運行し、電車やバスは運行本数を増発すること、信号間隔を変えることなどを発表している。また、当然のことではあるが、混雑に巻き込まれなければ混んでいるところには行かないこと、どうしても行く必要があるならば混雑している時間は避けること、移動時間は多く見積もること、などのオリンピック開催中の移動の心得が盛り込まれている。現在は閉鎖されているが、オリンピック開催中は普段よりどのくらい多くの移動時間が必要になるかをシミュレーションできる Web サービスが立ち上がっていた。

国立霞ヶ丘競技場

前節は主に駅周辺での混雑について紹介したが、次に競技場内での混雑と安全性の向上について紹介する。

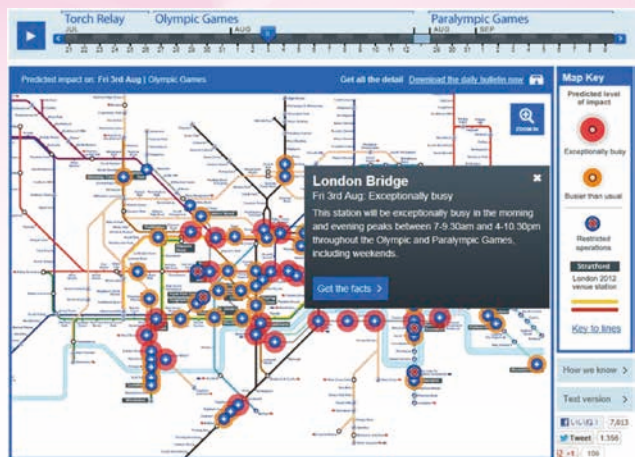
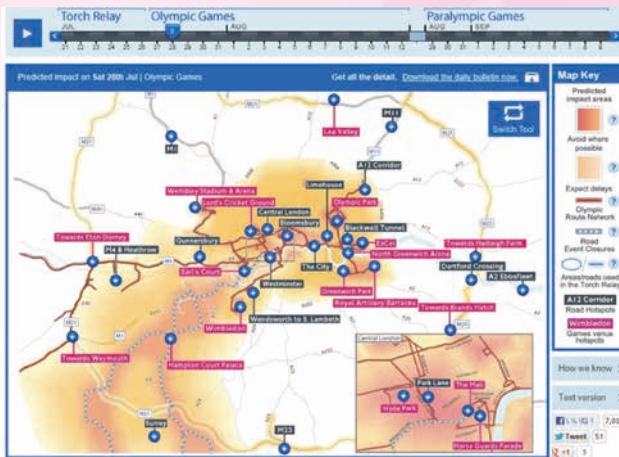


図-2 ロンドンオリンピック期間中に地下鉄はどのように混雑するか

2005年に発行されたアメリカ国土安全保障省の記事によるとサッカーの名門FCバルセロナの本拠地であるEL Camp Nou競技場において観客10万人規模の避難訓練では避難時間が15分、レアル・マドリードの本拠地であるSantiago Bernabeu競技場の訓練では観客8万人規模の避難時間が15分であったことが報告されている。この記事によると図-3に示すようにヨーロッパの競技場における避難時間は5万人規模で5分から12分半であることが推測される。イギリス文化省や国際サッカー連盟(FIFA)では安全性について定量的な基準を定めており(ともにすべての観客が8分以内に安全な場所に避難可能にすることを求めている)、特に同時多発テロのあったアメリカやヨーロッパにおいてはその意識が高い。

ユーデック(株)は国立霞ヶ丘競技場の安全性向上のためのシミュレーションを行っており、コンコースや通路、階段などのどの場所において動線が合流し、滞留が発生しやすいかを詳細に分析している。さらに、座席から出口までの避難には上記の基準以上に避難時間がかかることが見積もられており、スタンド内通路の拡幅、スタンドからピッチへの階段設置、スタンド内での誘導の3つの改善アプローチを組み合わせることで国際水準に近づくことが報告されている。

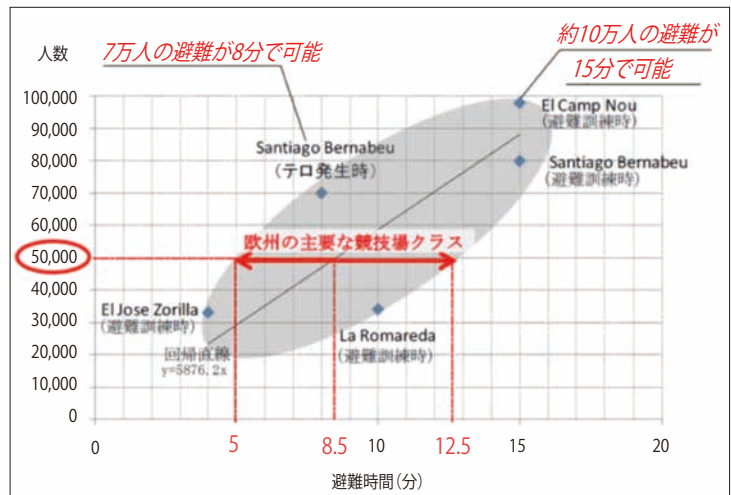


図-3 競技場の収容人数と避難時間の散布図

関門海峡花火大会

オリンピックの競技場や関連イベントに匹敵する多くの人が集まるイベントとして夏祭りや花火大会が挙げられる。筆者らが3年前からシミュレーションと計測を続けている関門海峡花火大会における適用事例について紹介する。

関門海峡花火大会で行う人流計測は、花火大会の見物客全体としての経路選択を把握するために、図-4に示されるようにステレオカメラを用いて複数の帰宅動線を通行する来場者数をカウントし、歩行速度の抽出を行った。この計測データから、複数ある帰宅動線の中で、特定の動線に集中していないか、帰宅の混雑のピークがどの程度継続したかが分析できる。また、図-5に関門海峡花火大会のある地点での帰宅方向での人流計測結果を示す。横軸が時刻を表し、縦軸が15分ごとの移動人数である。

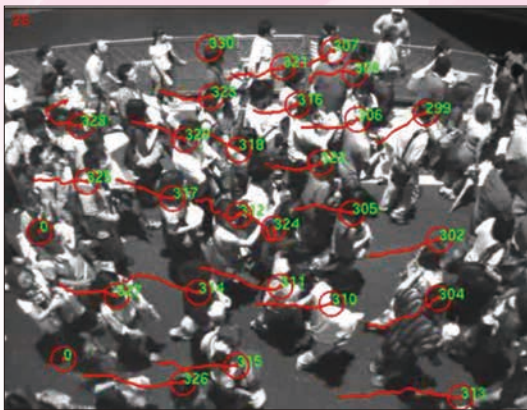


図-4 関門海峡花火大会の人流計測

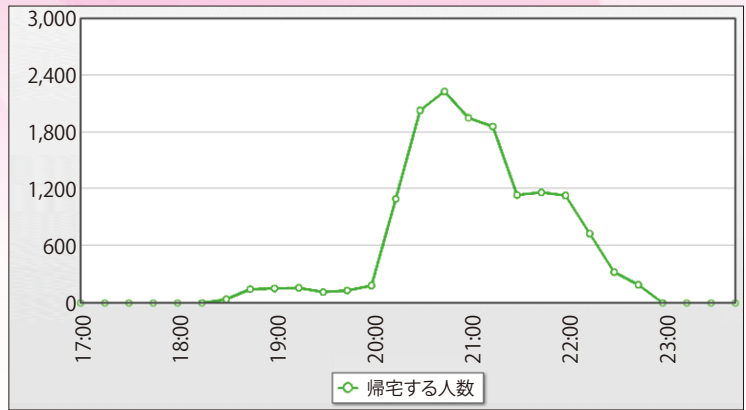


図-5 関門海峡花火大会での帰宅人数の計測結果



図-6 Web サイト「じーもの花火混雑マップ」のスクリーンショット

況を10分ごとに3段階（順調、混雑、渋滞）で判定し、その結果を情報集約係に報告する（今回のシステムでは同時に行っているステレオカメラによる人流計測と連携していない）。そして、情報集約係は地図画像に混雑情報を重畳し、配信用サーバにアップロードする。その結果、図-6に示される混雑情報が重畳された地図画像がスマートフォン対応のWebサイトで閲覧可能となる。

情報配信はWebサイトだけではなく、経路情報やイベント情報の配信にプロジェクションマッピング技術を応用して物客に情報提供を行う。図-7に示されるようなガイドプロジェクション（Guide Projection）は1行15文字程度で3行の文字情報を建物の壁面に投射し、経路情報やイベント情報の提供を行った。地図に混雑情報を重畳したような細かい画像を配信するには向かないが、特別なデバイスを持たない見物客に一度に情報を配信することに適している。

前述の人流計測や情報配信と合わせて、複数の施策が実施された場合の影響を評価するためのシミュレーションを行っており、安全性と効率性を両立する誘導を検討している。

歩行者の誘導に関しては、道路交通における交通情報の収集・提供、信号制御といった車両の交通管制に比べて、大規模な来場者を対象とした誘導、停止および分断といった規制の効果は定量的に論じられていなかった。このような背景を踏まえて、雑踏警備で行われる誘導手法のモデルを構築し、歩行者

花火大会が終了する20時40分の少し前の20時頃から急激に人数が増えていることが分かる。

見物客向けの情報配信では、花火打上終了後すぐに見物客を帰宅させずに、できるだけ花火大会会場に残すことを目的としている。Webサイトを通じた混雑情報やイベント情報の配信やプロジェクションマッピング技術の実用的な応用であるガイドプロジェクションを実施した。

見物客に向けた混雑情報配信サイト「じーもの花火混雑マップ^{☆3}」を「100ninmap⁴」をベースに構築して、リアルタイムに配信した。混雑状況を判定する計測員を3つの帰宅動線上の6カ所に配置する。各計測員が対象となっている帰宅動線の混雑状

☆3 じーものは福岡県北九州市門司区のマスコットである。
http://www.city.kitakyushu.lg.jp/moji/file_0006.html



図-7 関門海峡花火大会で行われたガイドプロジェクション

シミュレータへの実装を行っている⁵⁾。

歩行者の移動可能範囲を長さを持つネットワークのリンクとして表現する1次元空間モデルを実装した歩行者シミュレータ CrowdWalk¹⁾を用いて、図-8に示されている関門海峡花火大会の群集流動のモデルを構築している。誘導手法を実装した歩行者シミュレータを用いることで、誘導計画の効率性や安全性の定量的な検証を可能にしている。また、少数のシミュレーション条件を比較するという利用方法ではなく、クラスタ環境において数十万の試行を検証することで、交通規制や誘導方法の効果を把握するという利用方法の確立を目指している。

2020年東京オリンピック

これまで人の流れの解析技術と適用事例について概観してきた。最後に2020年の予想をして原稿を締めくくりたい。

2020年7月28日夜。今、東京オリンピックの開会式が終わった。会場は昨年新しく完成した国立競技場だ。開閉式の屋根を備えた全天候型ドームスタジアムとなっている。今日は晴れていたので屋根は全開だ。ところどころに花火の煙が流れている合間から星空が見える。8万人を収容できるこのスタジアムでは今日の開会式はもちろん、陸上競技やサッカーが開催される。日本が初戦であるイングランド戦が楽しみだ。



図-8 関門海峡花火大会の帰宅動線をモデル化した歩行者シミュレータ CrowdWalk のスクリーンショット

開会式が終わってしばらく経つものの混雑は収まらず、スタジアムから出るにはまだまだ時間がかかりそうだ。目の前の伝言掲示板には競技場から出るのに20分かかると表示されている。この推定時間を計算するためにスタジアム内に取り付けられているセンサを使って、人の流れを解析しているらしい。しかも、地震や火災などの緊急時にはスタジアム内の人の分布から、どちらへ逃げればよいか知られるという。10年ほど前にあった東日本大震災のときは東京にいた。多くの駅は閉鎖され、どこへ行けばいいかわからずにオロオロとしたが、これなら安心だ。

サッカーのイングランド戦はチケットを取れなかった人のためにパブリックビューイングが近くで開催されるらしいが、ネットの書き込み情報を解析した結果、試合後にこのスタジアム付近に人が集まり大混雑するようだ。でも、その混雑予想をもとにして警備員が配備されるというから安心だ。なにか緊急状況があるとセンサが検知して警備員に直接知らせるらしい。

そうこう考えているとようやく前の列が流れ始めた。このまま、駅まで行っても混んでいてなかなか電車には乗れないだろう。つくばの自宅に帰るには大江戸線の国立競技場駅が便利だが、まだ混雑しているに違いない。そういえば新しく始まったWebサービスでは現状の人の混雑具合を考慮して待ち時

間を計算してくれるという。ちょっと調べてみよう。国立競技場駅までの距離はたった200メートルだが、電車に乗れるのは50分後だ。明治神宮前駅までは歩いて20分。こちらの方が早く帰れるという検索結果が出た。明治神宮前駅で電車を15分待つようなので、途中の店でビールを1杯立ち飲みしてから帰ろうか。

リアルタイムの情報を反映したルート検索で待ち時間を見積もることができるようになった。その結果、時間を有効に活用することができる。このような技術は朝のラッシュや、電車事故の混雑時にも有効だろう。平常時、災害時ともに安心な日本は世界に誇れる科学技術に守られた国だ。海外から来た観客も安心してに違いない。

参考文献

- 1) Yamashita, T., Okada, T. and Noda, I. : Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-scale Pedestrian Flow, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.2, pp.137-146 (2013).
- 2) 日本建築学会編：群衆行動，建築設計資料集成 [人間]，丸善，pp.126-129 (2003).

- 3) 山内悠嗣，山下隆義，藤吉弘巨：[サーベイ論文] 統計的学習手法による人検出，電子情報通信学会技術報告PRMU, Vol.112, No.197, pp.113-126 (2012).
- 4) 宮部真衣，北 雄介，久保 圭，荒牧英治：街歩きで作り出す都市の様相地図—位置情報付きの様相記録収集の取り組み—，情報処理学会，グループウェアとネットワークサービスワークショップ2013 (GN Workshop 2013) 論文集，pp.1-8 (2013).
- 5) 山下倫央，野田五十樹：屋外大規模イベントにおける群集規制モデルの構築，人工知能学会全国大会2014 (JSAI2014) 予稿集，1C4-OS-13a-4, pp.1-2 (2014).

(2014年9月4日受付)

山下倫央 (正会員) tomohisa.yamashita@aist.go.jp

2002年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士課程修了。2003年産業技術総合研究所入所。現在，同所サービス工学研究センター主任研究員。2011年から現在まで，JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ「情報環境と人」研究員併任。社会システムシミュレーション，マルチエージェントシステムなどの研究に従事。博士 (工学)。

大西正輝 (正会員) onishi@ni.aist.go.jp

2002年大阪府立大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。同年理化学研究所研究員を経て，2006年産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員。現在サービス工学研究センター主任研究員。人流計測に関する研究に従事。