

大規模イベントにおける人流解析 —with コロナ社会に必要とされる研究課題—

大西 正輝

本稿では大規模イベントにおける人流解析を行うためのコア技術として人流計測、人流シミュレーション、人流制御の最適化手法について紹介する。さらに大規模イベントにおける人流解析への適用例として関門海峡花火大会の混雑緩和策の検討や新国立劇場の避難誘導支援の研究を紹介する。最後に with コロナ社会に必要とされる人流解析に関する研究課題について概観する。

キーワード：人流計測、人流シミュレーション、人流制御の最適化

1. はじめに

筆者らは花火大会やスタジアム、劇場といった多くの人が集まる大規模な空間において人の流れを計測し、かつシミュレーションすることで、帰宅時の混雑緩和策の検討や災害時の避難誘導支援を行うことを目的とした研究を行っている。特に単なるシミュレーション実験で終わらないように実際に現場で人の流れを計測し、現場の管理者などと協力しながら課題を洗い出し、それを解決するために実データで評価することまでを目指した研究を推進している。これまでに秋葉原の商業施設では10年近くにわたって人の流れを計測し、秋葉原無差別殺傷事件(2008年6月)や東日本大震災(2011年3月)で人の流れがどのように変化したかを解析してきた[1, 2]。また、関門海峡花火大会、新国立劇場、カシマスタジアムでは観客の流れを計測し、シミュレーションを行うことで実現場の課題に則した分析を行ってきた。

しかし、新型コロナウイルスの全世界的な広がりによってこれらの実証フィールドではイベントの開催中止を余儀なくされている。関門海峡花火大会においては2020年8月の第33回大会の開催中止が決定した。5月末の時点において、新国立劇場では6月末までのすべての公演が中止となり、7月以降の公演もチケットの発売を停止している。サッカーのJリーグは7月4日からJ1を再開し、プロ野球は6月19日に開幕することが決まっているが、当面の間は無観客試合での開催が予定されている。

このような社会の情勢が大きく変化しようとしている中で人の流れについて今後どのような解析が必要になってくるのだろうか。本稿では人流解析のためのコア技術やこれまでの研究事例を紹介すると共に、現状では不確定的な要素も多いが、新型コロナウイルスが短期的には終息せずに with コロナと呼ばれる共存社会を迎えたとすれば、今後どのような研究が必要になってくるかを概観する。

2. コアとなる人流解析技術

人流解析に必要なコア技術は計測、シミュレーション、最適化の三つであると考えている。以下でそれぞれについて説明していく。

2.1 人流計測

人の流れを解析するのに最も重要な技術は人の位置を正しく計測する技術である。人流計測方法としてはカメラなどの環境設置型のセンサを用いる方法とGPSなどの携帯型のセンサを用いる方法の二つが考えられる。前者は人が通行する環境にカメラなどを設置することによってそこを通るすべての不特定多数の人の流れを把握することができる。この方法は位置に関する計測誤差が小さいという利点があるが、計測範囲が狭く、また混雑する環境においては人が抽出できないことや追跡に失敗して途中でIDが入り替わるといった問題が生じる可能性がある。一方で後者のGPSのような携帯型のセンサを利用する方法は日本全国で個人を紐づけた状態で長期間にわたる人の位置を計測することができる反面、電波の届かない屋内空間では計測できないことや位置計測誤差が大きいこと、センサをもっている人しか計測できないため特定少数しか計測できないなどの問題がある。特にスマートフォンに搭載されているGPS情報は、プライバシーの問題があるこ

おおにし まさき
産業技術総合研究所人工知能研究センター
〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-7
onishi@ni.aist.go.jp

とからも大規模に収集するのは困難である。また、カメラと GPS の両方の情報を用いてお互いに足りない情報を補完する形で計測できていない領域を含めた人流推定に関する研究も報告されている [3]。

環境設置型のセンサは従来よりカメラを用いる方法が一般的で手軽であるが、二次元画像からの認識であるため人の正確な三次元位置がわからないという問題があった。そこでステレオカメラなどの距離がわかるセンサを利用することで三次元空間上での正確な人の移動を計測する手法が提案されている [4]。さらには、レーザを用いることで遠い距離においても正確な三次元位置が計測可能な LiDAR (Light Detection And Ranging) が安価になってきていることから、これらのセンサを用いた計測実験が大規模に行われるようになってきている。図 1 にカメラと LiDAR を用いた人流計測結果の一例を示す。(a) において丸は頭部の位置を表し、画像に線で過去の軌跡を重畳して可視化している。(b) においては復元した三次元の点群に頭部

の軌跡を重畳して可視化している。一般的な LiDAR の有効距離は最大 100 メートル程度であり、有効距離内ではカメラに比べて高い精度での位置計測が可能である。

これらの計測結果は現状の人流の把握はもちろんのこと、以下で説明するシミュレーションに用いる歩行者の移動のモデル化や評価のために利用される。

2.2 人流シミュレーション

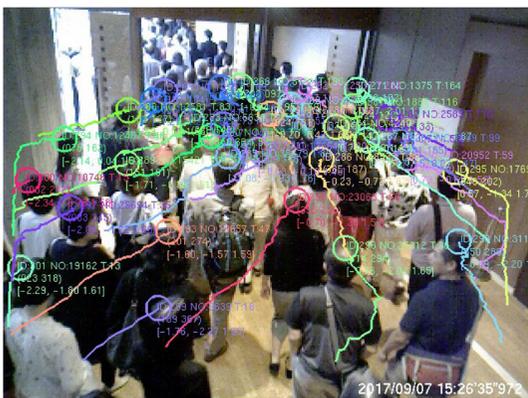
人の流れを分析するためには計測と共に人の流れを予測する技術も必要である。予測は一人ひとりの移動経路を設定した後に、それぞれの人の振る舞いをマルチエージェントシミュレーションによって計算するのが一般的である。この際の歩行者モデルとしては Helbing らの Social Force Model [5] を用いることが多い。Social Force Model は人の移動を運動方程式 $F = ma$ に見立ててモデル化している。具体的には歩行者が通常の移動速度になろうとする力や周辺の人や壁などから受ける斥力、友達や魅力的な飾り物などへの引力などの合力を F として、人の質量を m とした時に生じる加速度 a を求めることで歩行者の動きを予測する。

手軽に利用可能な人流シミュレータとしては早稲田大学による「SimTread」や構造計画研究所による「artiscoc」、Bentley Systems 社による「LEGION Simulator」などが挙げられる。筆者らは産業技術総合研究所において「CrowdWalk」というシミュレータを提案している [6]。本シミュレータは一次元の移動モデルを利用することで軽量でかつ実データに基づく高精度なシミュレーションが可能であるという利点もっている。図 2 にシミュレーションの例を示す。薄い線が通行可能領域を、丸が人を表しており、移動速度によって色を変化させている。

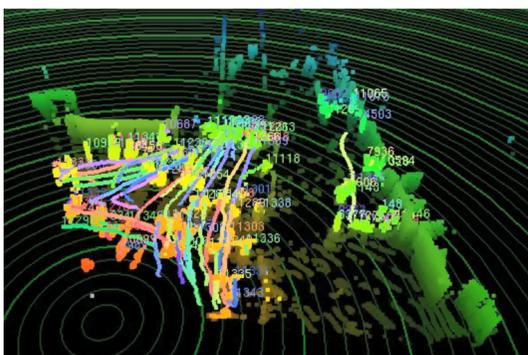
2.3 人流制御の最適化

条件を決めて人の流れのシミュレーションを行うことができるようになれば、次は最適化指標を定めて最適化を行う技術が必要である。一般にこのようなマルチエージェントシミュレーションを行うことで得られる目的関数はどのような形状をしているかは明らかではなく、シミュレーションを実行することで指標の値がわかるブラックボックス関数である。また、人流解析の問題は最適化するパラメータの次元数が高く、一試行に数秒から数分程度の時間がかかるのが一般的である。

このような問題はブラックボックス最適化として扱われるのが一般的である。最適化手法には連続最適化と離散最適化があるが、人流解析で扱う問題の多くは

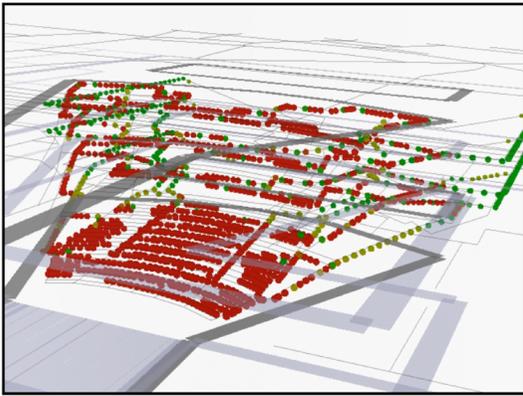


(a) カメラによる計測 (新国立劇場)

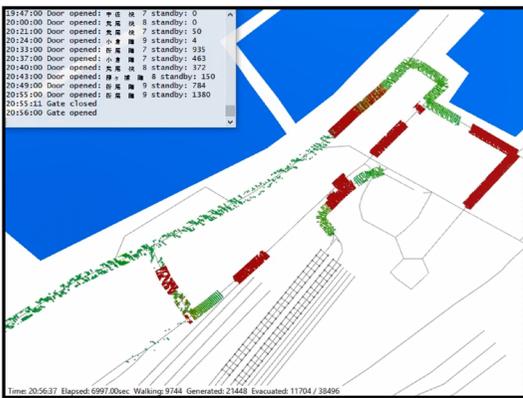


(b) LiDAR による計測 (関門海峡花火大会)

図 1 人流計測



(a) 新国立劇場における避難訓練



(b) 関門海峡花火大会における誘導制御

図2 人流シミュレーション

連続最適化である。また、関数の形状は明らかではないため勾配法を用いることができない。ブラックボックス最適化を解く最も単純な方法はグリッドサーチとランダムサーチであり、これらの手法は実装が単純で並列化が容易であるという利点はあるが、過去の探索結果を利用しないため効率の良い探索は期待できない。

過去の探索結果を利用しながらある程度の並列処理が可能な最適化手法として CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) のような進化的なアプローチが挙げられる。CMA-ES はさまざまなブラックボックス関数に対して 100 以上の最適化手法の中で最も良い性能を示したことが報告されている [7]。

また、目的関数の代わりに作成した代理関数を学習させながら最適化を行う手法としてベイズ最適化があげられ、評価回数が少ない場合にでも比較的よい性能を示すことが報告されている。人流解析においても観測された実データから全体の人流を推定する研究にも

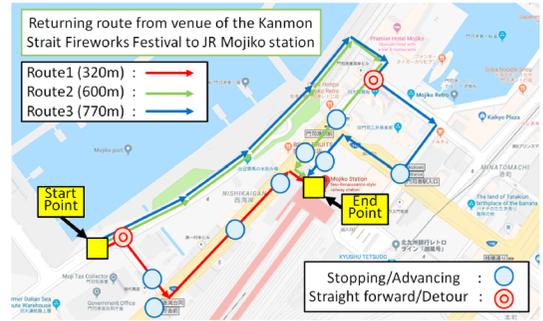


図3 関門海峡花火大会の三つの帰宅動線

利用されている [8] が、一般には直列処理であるため並列化には工夫が必要などの問題も指摘されている。

3. 実証フィールド

これまでに紹介した人流解析技術を用いて関門海峡花火大会の混雑緩和策の検討や新国立劇場の避難誘導支援の問題を扱ってきた。本節ではそれらの研究例について紹介する

3.1 関門海峡花火大会の混雑緩和策の検討

関門海峡花火大会は関門海峡の両岸である福岡県北九州市門司区と山口県下関市で同時に開催される西日本最大規模の花火大会であり、筆者らは 2012 年から毎年欠かさずに門司港駅付近で人の流れを計測している。

花火大会の会場から門司港駅へは図 3 に示す三つの帰宅動線があり、「直進・迂回」の命令を出す分岐制御地点が 2 か所、「進行・停止」の命令を出す信号制御地点が 8 か所あり、合計 10 か所で群集誘導制御を行っている。

花火大会が終了した後に帰宅しようとする人達の初期分布が計測できるとすれば、10 か所の誘導制御情報を与えれば、CrowdWalk を利用して駅へ帰るまでの群集の状態をシミュレーションすることができる。そこで、駅まで歩くのにかかる時間と混雑具合の分散指標に適当な重みを付けた和によって最適化指標を与え、シミュレーションによる最適化実験を行った。

最適化のパラメータは上記 10 か所の誘導制御地点に対して花火大会が始まる前と花火の打ち上げ中、終了後の三つの期間で信号制御による「進行(直進)」と「停止(迂回)」の二つの時間を決定する問題として、 $10 \times 3 \times 2 = 60$ 次元とした。最適化するパラメータの値は実数値であるため、計算実験ではランダムサーチ(RS)と CMA-ES を使い、比較評価を行った。それぞれの実験では 100 個体 \times 100 世代 = 10,000 試行の計算を行った。結果を図 4 に示す。横軸が計算試行

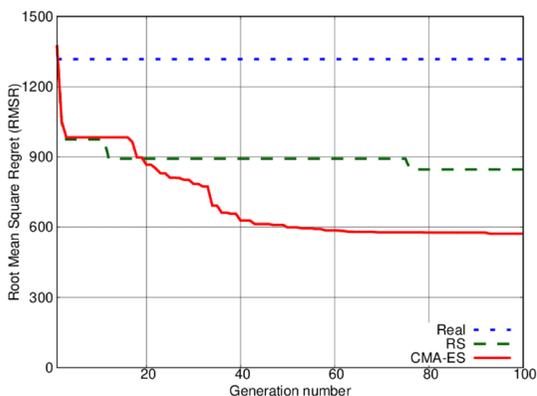


図4 ランダムサーチとCMA-ESによる帰宅時間と混雑指標の最適化実験

数（世代数），縦軸が評価指標であり，小さい値が良い群集誘導制御である．水平の点線であるRealは実際の花火大会の誘導を再現したものであり，ランダムにパラメータを探索することでも実際の誘導よりも良い結果が得られているが，CMA-ESを用いることでさらに良い結果が得られていることがわかる [9]．

本実験の1試行のシミュレーションには10分程度の計算時間が必要であり，10,000試行計算するには単純に2か月程度の計算時間が必要である．本研究では産業技術総合研究所がもつ計算インフラであるABCI (AI Bridging Cloud Infrastructure) で並列計算を行うことで1日を待たずに計算することができるようになった．今後さらなる高速化を進めることで人流のリアルタイム制御が可能なシステムを作り上げていく予定である．

3.2 新国立劇場の避難誘導支援

新国立劇場はオペラパレス，中劇場，小劇場の三つの劇場を有しており，オペラ，舞踊（バレエ・ダンス），演劇を上演している．筆者らは災害時の避難誘導の知見を得るためにこれまで4度の（2014年と2017年にオペラパレスで，2018年に中劇場で，2019年に小劇場で）避難体験オペラコンサートを行ってきた [10]．避難体験オペラコンサートはオペラ上演中に地震が発生し，舞台から出火，公演を中止し，観客が避難するというシナリオである．避難体験オペラコンサートの様子を図5に示す．

第1回目の2014年に計測した結果を見ると観客は前を見ていることから前の人の動きに追従して避難する傾向が強く，前方の扉付近で混雑が発生していた．シミュレーションを用いて避難時間が短くなるような最適化を行ったところ，劇場内の前後にある扉に同程



(a) オペラパレス



(b) 後方下手付近

図5 2017年の避難体験オペラコンサートの様子

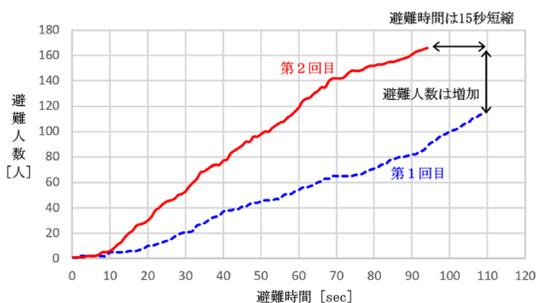


図6 後方下手における誘導方法の改善効果

度の人数が通過するように分かれることが最適であるとわかったため，2回目の2017年には誘導員は前方の混雑がなくなるように誘導することを心掛けた．さらに，計測結果から扉の開放状態が避難時間に大きく影響することが明らかになったため，事前に扉毎に案内係を決めておき，その案内係が避難開始時には扉を開放し，最後のスタッフの避難と同時に閉鎖することを徹底した．このような案内の工夫によって第1回目の避難実験では前方下手からの避難が269人，後方下手からの避難が114人と前方に混雑が発生したのに対



図 7 Unity によるウイルス拡散シミュレーションの例 [11]

して第 2 回目の避難実験では前方下手 177 人に対して後方下手 166 人とほぼ半々に分かれるような最適な誘導を行うことができた。さらに第 2 回目には扉を開けた効果もあって図 6 に示すように後方下手扉からの避難人数は増加したにもかかわらず、避難時間を短縮することに成功したことが実際の計測結果からも明らかになった。

4. with コロナ社会に必要となる人流解析研究

新型コロナウイルスが全世界規模で広がったことから、完全に終息するのは容易ではなく、当面は共存して生活していく必要がある可能性が高い。本稿執筆時の 2020 年 5 月時点では多くの大規模施設では再開の目途すら立っていない状況ではあるが、今後どのような人流解析研究が必要になるかを考えてみたい。

・最適化指標の検討

これまでの研究では待ち時間を短くすることや混雑が分散するといった指標を最適化していた。これからは接触人数を最小化することや接触者を特定できるような誘導方法にするなどといった新しい最適化指標を導入する必要があると考えている。これらを実現するためには接触確認アプリなどの計測結果も有効な手がかりになるであろう。

また、Unity は図 7 に示すような店舗内での新型コロナウイルスの拡散を想定したシミュレーション環境を公開している [11]。ここではランダムに人が歩いているだけであるが、店舗内で実際に計測した人の動きなどを反映することで感染拡大を抑えた商品レイアウトや人員配置の最適化を行う研究などが考えられる。

・ソーシャルディスタンスの計測と到達

大規模施設では混雑する場所が生まれやすい。計測した人物の位置関係から三次元的な物理的距離（ソーシャルディスタンス）を計測し、その距離が近くなった場合にはアラートを通達して該当者に知らせるなど

の研究が考えられる。また、ソーシャルディスタンスが小さくならないような空間のレイアウト設計や地面に描く印の効果測定なども必要になるであろう。過去に計測したソーシャルディスタンスに比べて大きくなるような施策を行う必要がある。

・新しい価値観の醸成

たとえばスーパーマーケットではこれまでは閉店間際になると売れ残りを少なくするという観点で商品の値下げが行われていた。今後はたとえば、混雑している時間帯は商品の値段を高くするといった価格制御を行うことで混雑を分散させる必要があるかもしれない。混雑具合によってどのように値段をコントロールするかといった最適化が必要である。

・社会の最適化

筆者らがこれまでに行ってきた研究の多くは単目的の最適化であるが、最近の研究では混雑緩和と命令の単純さといった複数の指標を用意し多目的最適化を行う研究を進めている。それだけではなく、今後このような人の流れの最適化を行う際には社会の最適化と個人の最適化の両方を考える必要があると強く感じている。これまでの最適化の研究の多くは個人は完全に制御可能であることを前提としている。しかし、ここで注意が必要なのは各個人の最適化が必ずしも社会の最適化につながらないこと、さらに現実世界では個人は自分の意識で活動するために社会の最適化が行われるかどうかに関係なく、個人の自由意志で最適化が行われることである。マスクやトレットペーパーの買い占めが起きる様子を見てこのような社会の最適化をどのように解決していくかを考える必要があると感じている。社会の最適化は単目的なのか多目的なのかや、このような最適化問題を解く際にはインセンティブデザインをどのように組み込むかなど多くの難しい問題を含んでおり、これからの長期的な研究課題になるだろうと予想している。

5. まとめ

本稿では大規模イベントにおける人流解析のためのコア技術と実証フィールドでの適用例について解説した。人流解析についての解説記事の依頼を受けた後、新型コロナウイルスの感染が広がり、各種イベント施設の休業が続く中でどのような解説記事を書くのが良いか全くアイデアが思い浮かばなかった。with コロナ社会の人流解析研究の節を書きながら何度も頭の中を整理してみたが、われわれの人流解析技術がどのように実証フィールドの役に立つかは未だもって確信が

もてていない。これから大規模イベント施設への休業要請が段階的に緩和され、花火大会や劇場、スタジアムといった実証フィールドにも客足が戻り、人流解析にも新たな課題が見えてくるだろうと思われる。そのような課題に迅速かつ柔軟に対応し研究を進めていきたい。何年か先には本解説記事を読みながらこんな時期があったのだと笑い話になる日が来ることを切に願って本原稿を締めくくりたい。

謝辞 本稿で紹介した研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- [1] 大西正輝, 依田育士, “大型複合施設における長期間にわたる人流比較と可視化手法,” 電子情報通信学会論文誌 (D), **J93-D**, pp. 486–493, 2010.
- [2] 大西正輝, 依田育士, 山下倫央, 野田五十樹, “【緊急報告】あの日秋葉原では何が起きていたか—東日本大震災時の秋葉原における人流解析—,” 画像の認識・理解シンポジウム, **IS2-45**, pp. 808–813, 2011.
- [3] 重中秀介, 大西正輝, 山下倫央, 野田五十樹, “データ同化を用いた大規模人流推定手法,” 電子情報通信学会論文誌, **J101-D**, pp. 1286–1294, 2018.
- [4] M. Onishi, “[Invited Paper] Analysis and visualization of large-scale pedestrian flow in normal and disaster situations,” *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, **3**, pp. 170–183, 2015.
- [5] D. Helbing and P. Molnár, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical Review*, **E51**, pp. 4282–4286, 1995.
- [6] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹, “一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用,” 情報処理学会論文誌, **53**, pp. 1732–1744, 2012.
- [7] N. Hansen and A. Ostermeier, “Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation,” *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 312–317, 1996.
- [8] 松林達史, 清武寛, 幸島匡宏, 戸田浩之, 田中悠介, 六藤雄一, 塩原寿子, 宮本勝, 清水仁, 大塚琢馬, 岩田具治, 澤田宏, 納谷太, 上田修功, “人流における学習型誘導技術のデータ同化,” 人工知能学会論文誌, **34**, p.wd-F_1–11, 2019.
- [9] S. Shigenaka, S. Takami, Y. Ozaki, M. Onishi, T. Yamashita and I. Noda, “Evaluation of optimization for pedestrian route guidance in real-world crowded scene,” *International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS2019)*, pp. 2192–2194, 2019.
- [10] 佐藤和人, 大西正輝, “新国立劇場における避難体験オペラコンサート,” 建築防災, **503**, pp. 22–27, 2019.
- [11] Unity, <https://blogs.unity3d.com/jp/2020/05/08/exploring-new-ways-to-simulate-the-coronavirus-spread/> (2020年5月20日閲覧)