

【自主研究】 歩行者動線分析システムの開発

竹村 太希

概要

都市・交通政策分野において、評価に用いられる代表的な指標として「歩行者交通量」がある。歩行者交通量調査では、測定手法として長らく人手による歩行者数カウントが用いられており、人件費がかさむことから高頻度・長期間に渡った調査は行われていないのが現状である。また、この歩行者交通量は人数をカウントするのみであり、得られるデータは単純な「量」のみとなっている。これからのまちづくりでは、歩行者の数だけでなく滞在時間・属性・移動経路を把握したうえで施策を検討する必要がある。

そこで私は、街中に小型定点カメラを多数設置し、得られた画像及びカメラの位置情報から、顔認証技術を用いて一人ひとりを追跡するシステムを提案する。これにより、従来どおりの歩行者交通量を低コストで長期間に渡って取得することが可能になる。更には、年齢層や性別等の属性データも同時に取得することが可能になる。こうした人々の回遊行動を定量的に把握できるシステムをオープンソース^{*1}で実装できれば、世界中の自治体において持続可能性のあるコンパクトな都市開発や、商店の集客戦略などに大きく寄与できるものと期待する。

^{*1} プログラムのソースコードを公開すること。

目次

第Ⅰ部	地方都市の動向と歩行者交通量計測手法	1
1	本研究の背景	1
1.1	国内の都市化の動向	1
1.2	地方都市中心街の活性化	5
1.3	活性化度合いの評価指標	6
2	歩行者交通量計測手法の先行研究	6
2.1	プローブパーソン調査	7
2.2	センサ利用型	7
2.3	カメラ利用型	8
3	先行の課題	8
3.1	開発コスト	8
3.2	不正利用への懸念	9
第Ⅱ部	本論	10
4	本研究の概要	10
4.1	手法	10
5	システム概要	13
5.1	構成	13
5.2	顔座標の検出 service_face_location	15
5.3	顔の特徴量の算出 service_face_encoding	15
5.4	同一人物の推定 service_face_grouping	16
5.5	性別推定 service_sex_detection	16
5.6	年齢推定 service_age_prediction	16
5.7	API サーバー db-controller	16
5.8	フロントエンド	17
5.9	地図タイルキャッシュ mapcache	17
5.10	分散処理	17
6	本システムの優位性	18
6.1	オープンソース	18
6.2	マイクロサービスアーキテクチャ・コンテナ	20
6.3	GPU・分散型による高速処理	20
6.4	関数型言語によるフロントエンド	20
7	想定する利用先	20
7.1	公共空間	20
7.2	民間	22

8	性能評価	23
8.1	顔検出精度評価	23
8.2	クラスタリング精度評価	23
8.3	性別・年齢推定精度評価	25
8.4	分散処理ベンチマーク	25
第 III 部 課題と利活用のあり方		27
9	今後の課題	27
9.1	プライバシー保護	27
9.2	解析精度	29
9.3	高速解析	29
9.4	ユーザエクスペリエンス	30
9.5	拡張性	34
10	利活用のありかた	34
10.1	問題点	34
10.2	事例 大規模複合施設における ICT 技術の利用実証実験	34
10.3	各法的側面からの考察	36
10.4	肖像権侵害の疑い	36
10.5	プライバシー権侵害の疑い	37
10.6	個人情報保護法の遵守	38
付録 A	試行実験	46
A.1	概要	46
A.2	長野県飯山市の状況	46
A.3	カメラ設置地点	46
A.4	作成したカメラデバイス	47
A.5	カメラデバイス配置	48
A.6	顔検出精度の検証結果	50
A.7	考察	51
付録 B	ディープラーニングについて	52
B.1	機械学習とはなにか	52
B.2	ディープラーニング	53
B.3	発展ディープラーニング	56
B.4	CNN	56
B.5	ResNet とは	56
B.6	ディープラーニングの民主化	57

第 I 部

地方都市の動向と歩行者交通量計測手法

現在、多くの地方都市で既に郊外化が進み、低密度な土地利用がなされている。更に、少子高齢化による人口減少も進み、今後さらに過疎化が進むことが心配されている。

そこで、コンパクトシティを形成し、都市の持続可能性を高める必要性が叫ばれている。都市機能を中心市街地などに集約することで、生活利便性を向上させたり、また持続可能で効率的なインフラを形成したり、地域経済を再生するといったことが可能になると期待されている。

では、どこへ都市機能を集約すればいいのだろうか。そして、どうしたらまちなかににぎわい^{*2}を取り戻すことができるのか。こうした問題を解決するために、データに基づいた形で縮小都市計画を立て、また評価する必要があると考えた。

そこで第 I 部では、まず現在の地方都市の姿を記した上で、縮小都市計画の必要性を示した。その上で、評価指標として広く用いられている「歩行者交通量」に着目し、先行研究とその課題を整理した。

1 本研究の背景

1.1 国内の都市化の動向

現在、日本国内のほとんどの人が都市に居住している。近年まで都市は成長の一途を辿り、1990 年時点では日本国内の都市居住率が 77% であったのに対し、2018 年時点では 92% へと達している [2]。

都市の拡大による郊外化、またバブル崩壊後の経済対策として全国で道路建設がすすんだことなどから、国内の多くの地方都市でスプロール現象^{*3}が広く見られるようになっていく。また多くの地方都市において適切な都市計画が不足していたため、現在では低密度で分散した地域が広く形成され、以下のような問題（スプロールコスト [3]）を発生させている [4]。

社会的基盤が十分に整備されないことによる社会的損失・外部不経済

道路などの交通インフラが適切に整備されず、旧来の道路をそのまま使うことで渋滞が生まれる。また、必要な都市施設が配置されない（または点在して配置される）ことにより、様々な都市サービスが不足する。

インフラコストの上昇

住宅や施設が点在し集約されていないため、長く非効率なインフラネットワークにならざるを得ない。また、一度スプロール地域が形成されてしまうと、その後のインフラ整備において計画的市街地の場合と比べ 5.1 倍の費用を要するという試算もある [5]。

景観の悪化

図 1 や図 2 のように、農地の中心に突然住宅エリアやマンションが現れるといった奇妙な光景が生まれる。

一方、今後はほとんどの都市が縮小に向かうことがほぼ明らかになっている。国立社会保障・人口問題研究所 [7] によれば、2045 年には 2015 年と比較してすべての都道府県で人口減少が見込まれている。また市町村レベルでは、94.4% の市町村で人口が減少すると予測されている。そして市町村全体のうち、20.5% が 0～2 割、

^{*2} 一定の空間内に多様な属性がある程度集まり活動（回遊）している状態 [1]

^{*3} 都市的土地利用が無計画に散在する状況を指す。虫食い状態のように見えるので、蚕食現象ともいう。



図1 スプロールを構成する典型的なミニ開発 岡山
県津山市 (引用: [4])



図2 田園地帯にそびえるスカイタワー 41 山形県上
山市 (引用: [6])

33.0% が2～4 割, 40.9% が4 割以上の人口減少を経験すると予測されている。

ここまで述べてきたように, 各都市の人口は減り, 多くの地区において大幅な人口減少を経験することになると予測されている。そのような状況下で, 既にスプロール現象が起きている地域で人口が減る一方, 都市の広さは急激な変化に追いつけず, 今まで以上に低密度な地域が形成されることが想定される。その様子を饗庭 [8] は「スポンジ化」と表現し, スプロール化との違いを表1 にまとめている。

表1 スプロールとスポンジ化の違い (引用:[8])

	前提		特徴			
	人口の圧力	土地所有	規模	変化の方向	発生する場所	見えやすさ
ス プ ロ ー ル	強い 住宅市場の成長	農地開放 により土地を 得た農業者	中規模	農村的土地 利用から都 市的土地利 用への単方 向の変化	比較的少数の 中心との関係 で説明できる	見えやすい
ス ポ ン ジ 化	弱い 脱市場化	個人	小規模 超小規模	逆方向・ 多方向の変化	ランダム	見えにくい

スプロールによる郊外化が, ショッピングモールやマンション建設といった形である程度の規模をもって進むのに対し, スポンジ化は1つの住宅単位で起こることが特徴である。また, スプロールは中心市街地から外側に向かって徐々に起こるのに対し, スポンジ化はランダムに, 中心部との距離に関係なく起こることが特徴である。例えば, 「シャッター商店街」のような中心部の低利用化と同時に, 郊外部の空き家化も起こりうる。

また, スプロールは住宅市場などに組み込まれる形で起こるのに対し, スポンジ化は市場から撤退する形で起こるのも特徴であり, 土地や物件の再利用等を困難にさせている。

スプロールもスポンジ化も, 低密度化という点で共通している。そのためスポンジ化が進むと, スプロールコストがさらに深刻化することが懸念される。具体的には, 以下のような問題が課題として挙げられている [9]。

都市の生活を支える機能の低下

医療・福祉・商業等の生活サービスの維持が困難になる。

地域経済の衰退

中心市街地において, 未利用地や空き店舗の増加といった衰退が見込まれる。また, 地域の産業の停滞・企業の撤退が想定される。

財政状況の悪化

今後、各地のインフラの老朽化が広範囲に渡って進み、維持管理・更新費の増大が見込まれる。国土交通省が所管するインフラ 12 分野^{*4}に係る維持管理・更新費は、2018 年の 5.2 兆円から 30 年後の 2048 年には 5.9～6.5 兆円と、およそ 1.3 倍に増えると試算されている。また、今後 30 年間の維持管理・更新費の合計は、176.5～194.6 兆円程度となる [10]。

また、老朽化の進展予測として、建設後 50 年が経過した各種インフラの割合を 2010 年と 2030 年で比較したものを、表 2 に示す。

仮に今後のインフラへの投資総額を 2010 年度のまま固定し、維持管理・更新に従来どおりの費用の支出を継続すると仮定すると、2037 年度には維持管理・更新費が投資総額を上回ると予測される。そして 2011 年度から 2060 年度までの 50 年間に必要と予測される更新費 (約 190 兆円) のうち、約 30 兆円が不足することになる [11]。

上記のように、今後インフラ維持にかかる費用が大きく増加していき、地方財政を圧迫すると予測されている。このままでは、各都市の持続可能性が脅かされることとなる。

表 2 建設後 50 年経過したインフラの割合 ([11] より作成)

種別	2010 年	2020 年 (予測)	30 年 (予測)
道路橋 (橋長 15m 以上)	約 8%	約 26%	約 53%
排水機場・水門など	約 23%	約 27%	約 60%
下水道管きょ	約 2%	約 7%	約 19%
港湾岸壁	約 5%	約 25%	約 53%

^{*4} 国土交通省所管 12 分野 (道路, 河川・ダム, 砂防, 海岸, 下水道, 港湾, 空港, 航路標識, 公園, 公営住宅, 官庁施設, 観測施設) の国, 都道府県, 市町村, 地方公共団体, 地方道路公社, (独) 水資源機構, 一部事務組合 (海岸, 下水道, 港湾), 港務局 (海岸, 港湾) が管理者のものを対象に推計。鉄道, 自動車道は含まれていない。このほかに, 高速道路 6 会社は, 維持管理・更新費として約 19.4 兆円 (2019 ～2048 年度) を予定。

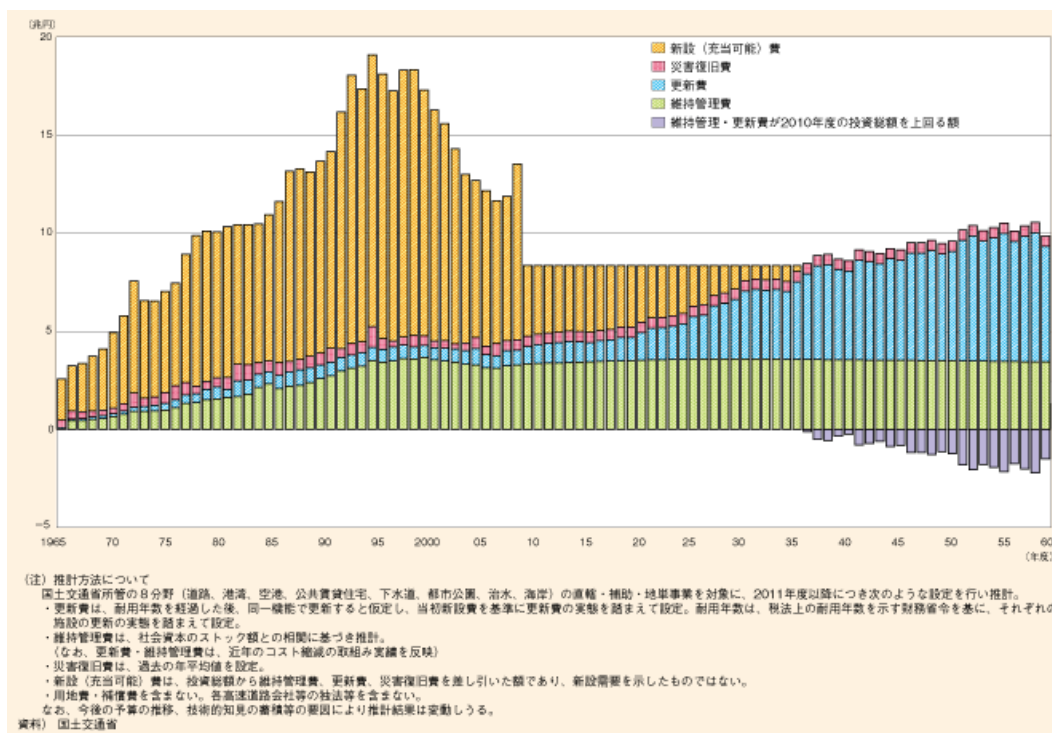


図3 従来どおりの維持管理・更新をした場合の費用推計 (引用: [11])

地球環境への悪影響

コンパクトシティや環境関連政策において、都市構造と自動車 CO₂ 排出量の関係が注目されている。図4は、越川ら [12] が日本の都市におけるそれらの関係性を、代表的な指標である Newman-Kenworthy 散布図で表したものである。また、1987年から2015年に至るまでの同様の関係を、回帰分析した結果が表3である。

人口密度が低いコンパクトでない都市ほど、車に依存し CO₂ 排出量が増えることが分かる。また自動車の普及と合わせて、過去から現在まで高密度都市と低密度都市の間での環境負荷の差が拡大してきたこともわかる [12]。

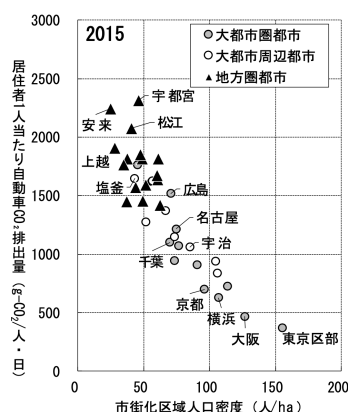


図4 都市ごとの市街化人口密度と、自動車による二酸化炭素排出量の関連 (2015年, 引用: [12])

表3 居住者一人あたり自動車 CO₂ 排出量および市街化区域人口密度に関する回帰分析結果 (引用: [12], 一部改変)

	1987年	1992年	1999年	2005年	2010年	2015年
回帰係数	-5.57	-7.77	-7.08	-11.18	-14.15	-14.98
定数項	1265.01	1583.89	1517.24	2097.40	2278.60	2389.83
相関係数	0.66	0.75	0.57	0.86	0.89	0.90

従属変数: 居住者一人あたり自動車 CO₂ 排出量 (g-CO₂/人・日)

独立変数: 市街化区域人口密度 (人/ha)

結果は全て $p < 0.01$

1.2 地方都市中心街の活性化

このような背景を踏まえ、都市を持続可能なものへと変えるために、国全体でコンパクト・プラス・ネットワーク [9] への取り組みを進めている。図 5 に示すように、都市をコンパクト化し密度を高め、交通ネットワークで都市間を繋ぐという政策である。

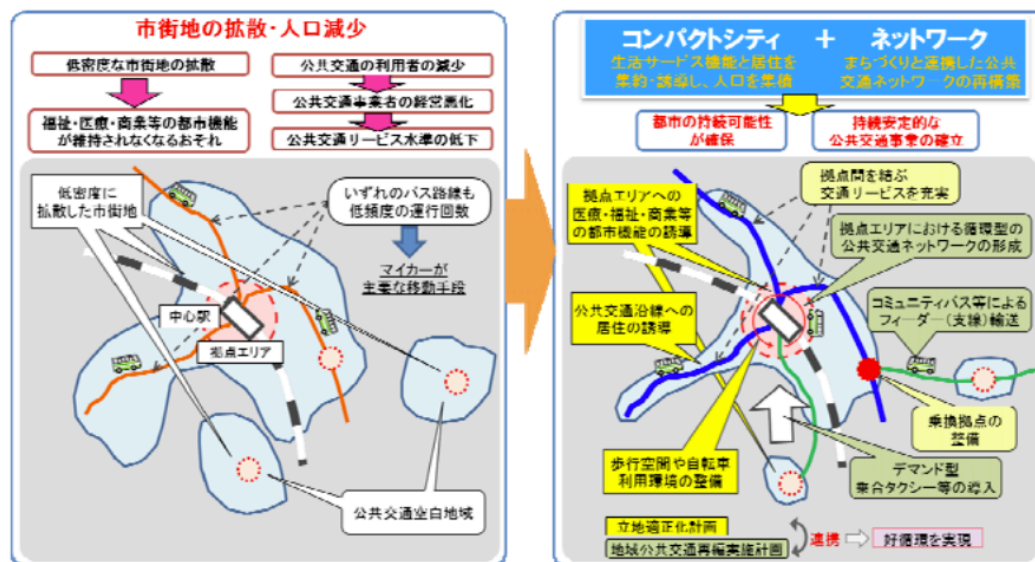


図5 コンパクト・プラス・ネットワークの形態 (引用: [9])

これが実現すれば、以下のような効果がある [9]。

- 生活便利性の維持・向上:
生活サービス機能の維持や、それら施設へのアクセス確保による利用環境の向上。
- 地域経済の活性化:
サービス産業の生産性向上・投資誘発に繋がる。また外出機会や滞在時間の増加による消費拡大が見込まれ、地域の経済が活性化する。
- 行政コストの削減:
インフラの維持管理や行政サービスが合理化され、持続可能な都市運営が実現する。
- 地球環境への負荷の削減:
コンパクトなためエネルギーの効率的な利用が促進され、低炭素型の都市構造が実現される。

この縮小都市政策を実現させる上で、中心市街地が主な集約先として想定されている。しかし現在、多くの地方都市において中心市街地、いわゆる「まちなか」と言われる場所は活力を失っている。

このような中心市街地は現状のままでは魅力に欠けるため、集約がスムーズに進まない可能性がある。そこで日本政府は中心市街地活性化制度を整備し、中心市街地の都市機能の増進および経済活力の向上を目指している。この制度に対応し、各市町村が中心市街地活性化基本計画を中心市街地活性化協議会^{*5}と共に作成し、実行し、評価している。

しかし、中心市街地活性化法が2006年に改正されてから7年経過した2013年に内閣官房地域活性化統合事

^{*5} 地域の商工会議所などで構成される協議会。中心市街地の活性化に関する法律第九条第一項の規定により、市町村が作成しようとする基本計画並びに認定基本計画及びその実施に関し必要な事項その他中心市街地の活性化の総合的かつ一体的な推進に関し、必要な事項について協議する。協議会は市町村に対し、同法第九条第一項の規定により市町村が作成しようとする基本計画並びに認定基本計画及びその実施に関し必要な事項について、意見を述べることができる [13]。

務局 中心市街地活性化推進委員会がまとめた報告書 [14] では、中心市街地は依然として厳しい状況にあるとされている。中心市街地の事業所数・販売額は減少し、空き店舗は増加している。また、大規模小売店舗の出店件数・立地店舗面積とも中心市街地への立地は少なく、直近ではロードサイドを含めた中心市街地外や隣接市町村への立地が増加しているとともに、医療・福祉施設の郊外の立地も増加している。

1.3 活性化度合いの評価指標

まちなかににぎわいが生まれれば、そこにより多くの人が集まり、地域経済の活性化や都市のコンパクト化が見込まれる。そこで活性化の施策を効果的に進めるために、まちの活性化度合いを定量的に測り、評価することが必要となる。

活性化度合いを直接測る指標として、店舗の売上高や地価が考えられる。しかし店舗の売上高は毎年公表されるとは限らない。また地価は、活性化の取り組みの効果が反映されるのに時間がかかる。そのため、これらの指標は中・長期的には役立つと考えられるが、多くの中心市街地が衰退し危機的状況に置かれている中、迅速な評価が求められる状況下で用いるのは効果的とはいえない。

そこで、現在街の活性化度合い等を定量的に表す指標として主に利用されているのが「歩行者交通量」である。内閣府では歩行者量調査のガイドライン [15] を設けており、その中でまちの活性化度合いと歩行者量には相関があり、継続的に計測し分析・評価することは地域活性化の取組みを効果的に進めることに有用であるとされている。

実際に中心市街地活性化基本計画を作成し、内閣府地方創生推進事務局に申請し認定された都市のうち 9 割以上が、歩行者交通量を目標指標として設定している。

また、民間企業での活用もなされている。例えば、大型商業施設の建設計画などの比較的大規模な事業を行う際には、周辺地域の交通量調査を行うことがある。これは施設運用時の客数の予想といった、経済的な影響を鑑みた建設計画に貢献している。また、個人事業主等が経営する小規模な店舗の出店時には、出店予定地の接道や店舗付近の交通結節点^{*6}の交通量や通行者の属性を把握する。これにより、その土地が持つ歩行者特性を把握し、消費者のニーズに沿った経営戦略を計画することが可能になる。

ここまで述べてきたように、地方都市中心街の活性化を進める公共事業ならびに民間事業において、歩行者交通量の計測を継続的にやり、分析・評価することは欠かせないものとなっている。

2 歩行者交通量計測手法の先行研究

セクション 1.3 で述べた歩行者交通量は、主に人手によって計測されている。これは、計測したい地域に複数の計測ポイントを設け、監視員を配置し目視で歩行者数をカウントするものである。中心市街地活性化基本計画の目標指標として歩行者量を設定した都市の多くが、この人手による調査を行っている。

歩行者量には、調査時の時間や気象条件、イベントの有無等で大きな変動がある [15]。施策の効果を正確に分析・評価するためには、安定的なデータの取得が必要であり、できるだけ計測日を多く取ることが望ましい。しかし人手による計測方法では人件費がかかり、コスト面から実施できる回数・時間は限られている。表 4 に示すように、実際に歩行者量調査を行っている市では回数及び調査箇所数が限定的である。そのため数回の調査では、調査時の時間・気象条件やイベント開催状況といった影響を回避することができない。

また、シンプルに数のみをカウントしているため、個人の性別や年齢層といった属性データは集めることができない。そのため歩行者属性の把握には至らないという問題がある。

^{*6} 主に交通工学や都市工学で用いられる、異なる交通手段を相互に連絡する乗り換え・乗り継ぎ施設を示す用語。ハブとも呼ばれる。具体例として、鉄道駅・バスターミナル・空港・駅前広場等が挙げられる

表4 実際に歩行者量(通行量)調査を行った市における仕様例 ([15]より作成)

都市	人口規模	中心市街地の面積	調査時期	平日	休前日	休日	調査箇所数	調査時間帯
A市	約20万人	約230ha	6・8・10月	0	3	3	17	9:00～19:00
B市	約10万人	約180ha	10月	0	1	0	1	10:00～18:00
C市	約3万人	約100ha	9月	0	0	1	13	8:00～19:00
D市	約40万人	約180ha	10月	0	0	1	42	10:00～20:00
E市	約10万人	約110ha	6月	1	0	1	6	10:00～18:00

更には一人ひとりの行動を追跡できないため、回遊行動の把握は難しい。回遊行動を把握することは都市計画の上で重要である。柴田 [16] は人々の行動や動きを把握し、その線を把握することが必要であり、日常生活やそれを支える行動・場所のパターンを踏まえて考えることが重要であると指摘している。しかし目視による既存手法では、こうした動線を定量的に把握することは極めて困難である。

こうした現状を踏まえ、近年では新たな計測手法が検討されている。先行で提案されている手法は、プローブパーソン調査*7とセンサ利用型、カメラ利用型に大別される。本セクションでは、これらの手法について既存の研究成果をまとめて紹介する。

目視による既存の手法と、3種の先行研究の大まかな特徴を、表5にまとめた。

表5 歩行者交通量調査の手法とその特徴

手法名	全数調査	個人追跡	属性把握	その他
目視	✓	✗	✗	コストが高い・実施日の環境に左右
プローブパーソン調査	✗	✓	✓	精度が高い
レーザ等センサ	✓	✗	✗	
カメラ	✓	✓	✓	国内では、まちなかでの動線把握例なし

2.1 プローブパーソン調査

モバイルデバイスのGPS情報を用いたプローブパーソン調査は、大森ら [17] や朝倉ら [18] によってPHSやフィーチャーフォンが普及した2000年頃に確立された。

近年では、安藤ら [19] が岡山市中心市街地に置いて実施された回遊性向上社会実験において、歩行者のスマートフォンにアプリをインストールすることでGPS情報を取得し、回遊行動の調査を行っている。また、味八木ら [20] はカメラ映像と市街地にあるWi-Fiアクセスポイントを用いて、モバイルデバイスの位置を特定する手法を提案している。

こうしたプローブパーソン調査については、長期間に渡っての高精度な追跡が可能であり、調査対象者にアンケートを取ることで個人の属性データの取得も可能である。しかしながら欠点もあり、屋内ではGPSの電波が届きづらいため、追跡が困難となる。また、モバイルデバイスを保持する歩行者の協力が必須であることや、そうしたデバイスを持たない年齢層もあることから、全数調査は現実的とはいえない。そのため調査結果に対して、バイアスの排除や、精度の点で疑問が残ることとなる。

2.2 センサ利用型

長田ら [21] は、受動赤外線型計測器を用いて連続的に計測する手法を検討している。ここで長田らは、ほぼ目視に近い精度での歩行者数カウントを、常時行うことが可能であることを示した。しかしこの手法は歩行者数

*7 歩行者のモバイルデバイスからGPS情報を取得するなどして、個人を追跡する手法

をカウントするに留まるため、歩行者特性や回遊行動の把握は同時に実現できない。

また、プローブパーソン調査とセンサを組み合わせた手法として、高藤ら [22] はモバイルデバイスとレーザ測位スキャナを用いた手法を提案している。この手法は、GPS を用いたプローブパーソン調査が難しい屋内においても、高い精度で移動軌跡を特定することを可能としている。しかし、モバイルデバイス所持者の協力が必須なことには変わりなく、やはり全数調査は現実的でない。

2.3 カメラ利用型

近年の急速な画像処理技術の発展に伴い、カメラを用いた手法が使われ始めている。この手法は既に自動車交通量計測において活用が進んでおり [23]–[25]、歩行者交通量調査においても活用例がみられる。

カメラを用いた手法では、まず物体検出アルゴリズムを用いて、取得画像内から人物の位置を推定する。そして、画像内から検出できた人物の数を歩行者交通量とするものである。

愛知県豊田市では、豊田市中心市街地歩行者通行量自動計測事業を行っている [15]、[26]。ここでは市街地に設置したカメラ画像を解析し、各地点での人数を調査している。自動計測のため年間を通じた計測を実現しており、通勤時間帯などの特定の時間帯や天候等の影響を取り除いた上で分析をすることが可能となっている。

六本木商店街振興組合においては、カメラ画像を活用して歩行者数を計測し、そのデータを元に商店街の施策を検討している [15]。また、来街者の属性に応じたサイネージコンテンツの切り替えを実施している。

更には、画像内の人物の顔から特徴量を抽出し、個人を特定した上で追跡することで回遊行動を把握する手法も存在する。福本ら [27] は商業施設内において、顔認識システムで個人を特定し、滞在時間の調査を実施している。さらに日本電気株式会社では、主に商業店舗内において、人物の属性・動線・行動把握を可能にするソリューションを提供している [28]。これは店舗内における顧客の属性だけでなく、回遊行動や、購入前の検討時の動作を解析することで顧客体験の向上を図るものである。

海外では、更に先進的な取り組みが見られる。中国 Alibaba 社は、同社のクラウドプラットフォームである Alibaba Cloud 上で、ET City Brain と呼ばれるプラットフォームを提供している。これは各地に設置されるカメラなどから、様々な都市データをリアルタイムで収集し、分析した上で交通整理、公共サービス、産業などに活用するものである。すでに中国杭州市などで導入が進み、データ駆動型ともいえる都市運営に注目が集まっている。

ここまで述べてきたように、カメラで撮影された画像を用いる手法は、歩行者数だけでなく、同時に属性や回遊行動まで把握することが可能である。また、歩行者側の操作が一切必要なく、カメラで捉えることができる場所ならば推定精度の問題はあれど、全数調査が可能という利点がある。

3 先行の課題

セクション 2.3 で述べたように、カメラ画像を用いて人々の動線や属性を把握し、都市計画に応用することには大きな可能性がある。しかしながら、先行研究には以下の課題がある。

3.1 開発コスト

動線や属性の分析システムの構築を、導入主体（自治体など）が自らが行うことは現実的ではない。そこで民間企業に開発を委託することになると考えられるが、それにはコストがかかる。また、各導入主体でそれぞれ開発を行うことは非効率的である。

3.2 不正利用への懸念

まちなかにおいてカメラを設置し、顔写真を収集して個人を追跡し分析することには、不正利用に対する懸念が存在する。

海外における事例として、Sidewalk Labs 社によるトロントのキーサイド地区の再開発計画^{*8}を挙げる。本計画は、Sidewalk Labs がまちなかにおけるセンサなどから情報を収集し、分析することで効率的な都市運営をおこなう計画であった。しかしながら、公共空間のデータを会社が収集することに対して批判の声が上がっていた。同社は個人データを匿名化し、クラウド上への公開はしない、また販売・広告への使用・同意なしの第三者への共有は行わないとしている。そして、Urban Data Trust という独立した組織を立ち上げ、データの収集や利用に関してチェックする体制を整えるとしている [30]。しかし、データ信託機関の方針が同様であるかを明確にしていないことなどもあり、反対運動などが起き、複数の社員が辞任するなどの出来事も起きている [31]。

日本においても、スマートシティ化を目指す動きが進んでいる。2020 年 5 月に成立した「スーパーシティ法^{*9}」においては、「まるごと未来都市」を目指し、スーパーシティ構想を立ち上げ大幅な規制緩和、データ連携基盤の整備を進めていくとしている。しかしながら、個人情報保護への取り組みが不明瞭であったり、ケースによっては同意無しで情報が提供される場合もあることから、不正利用を懸念して批判的な意見が多くでている。

このように、データを外部企業にオプトアウトすることに対して、不正利用に関する懸念を払拭することは極めて困難であり、都市計画の実行に際して大きな障壁となることがある。

^{*8} Sidewalk Labs は、Covid19 による不動産市場の不確実性の高まりを理由に、本計画を廃止している [29]。

^{*9} 国家戦略特別区域法の一部を改正する法律

第 II 部

本論

第 I 部までの内容を踏まえ、カメラをまちなかに設置し個人追跡を行うことで、人々の動線や属性を把握するシステムを提案・開発した。第 II 部では、開発したシステムの原理・構成を紹介するとともに、先行研究と比べた優位性や、想定する利用先を示した。また、各種性能評価も行った。

4 本研究の概要

セクション 2.3 で述べたカメラを利用した手法は、歩行者数だけでなく動線・属性・滞在時間等を一度に、また継続的に得ることができるという明確なメリットが存在する。そこで本研究では、中心市街地にある監視カメラを利用（あるいは新しく定点カメラを設置）し、そこから得られた画像を用いて個人を追跡し、その動線・属性などの各種データを可視化する分析システムのプロトタイプを開発する。このシステムを通じて、データ駆動形の都市計画を推進し、中心市街地活性化施策の立案・評価が進むことが期待される。

また、セクション 3 で示した課題を克服するために、オープンソースでの実装を行う。コードを公開することで最大限の透明性を確保する。また、分析に用いるシステムを自由に配布することで、多くのユーザの活用を促進し、各地で定量的な歩行者交通量の把握を可能にする。オープンソースで実装することによるメリットの詳細は、セクション 6 に記す。

またプライバシー保護を充実させるため、将来的にはカメラ画像撮影時に瞬時に暗号化を行い、秘密計算を行うことで不正利用を防ぐ。この手法については、セクション 9.1 に詳細を記す。

4.1 手法

本システムにて想定している歩行者行動軌跡把握手法の概要を以下に記す。

本システムでは中心市街地内各所に小型定点カメラを設置し、連続撮影を行う。その後各地点にて撮影された画像をもとに、「顔の位置」・「顔の特徴量」を算出するとともに、性別・年代といった属性を推定する。その後各地点にて補足された多数の「顔の特徴量」データに対しクラスタリング操作を行い、同一人物と推定されるものをグループ化する。そして図 8 のように一人ひとりの動線及び滞在時間などを把握したのち、地図上に線を引き可視化する。

以上のプロセスを経て、歩行者の回遊ネットワークを推計・可視化することが可能となる。

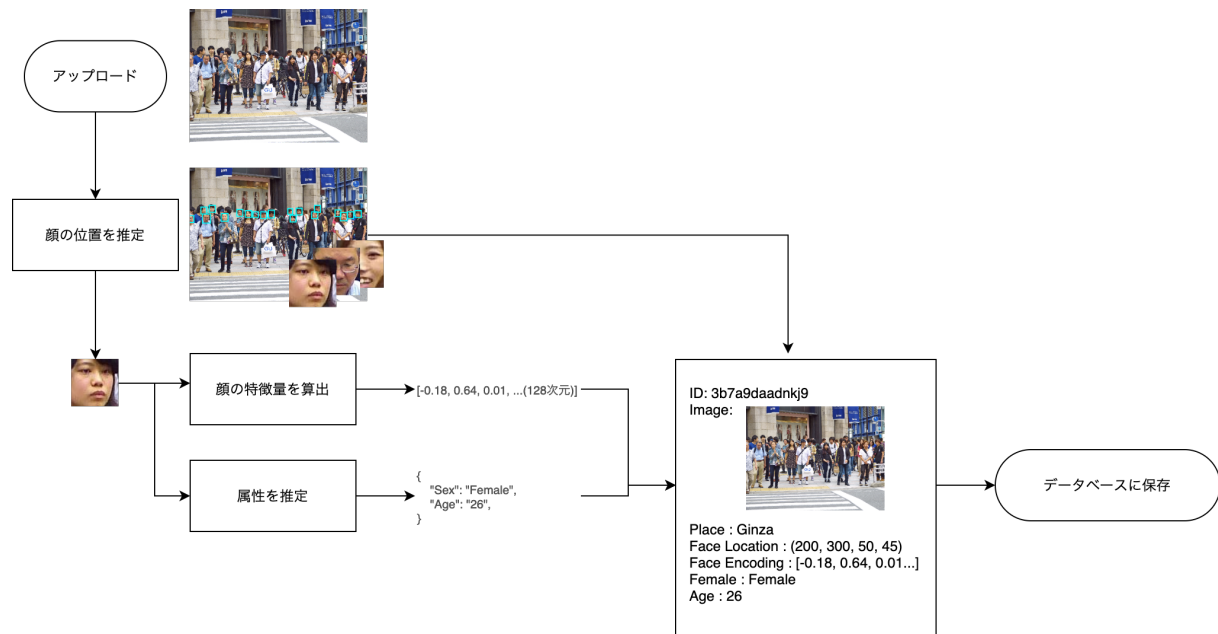
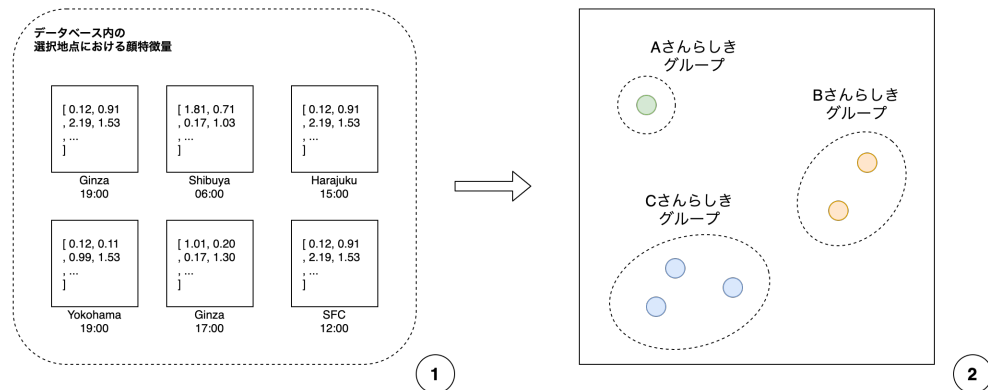


図6 画像アップロード時の処理

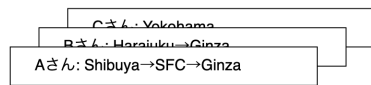
同一人物推定

クラスタリングで、似たような特徴量を持つ顔をグループ化する



経路推定

一人ひとりの移動経路を算出



地図上で可視化

経路を集計し、地点間の人口移動を地図上で可視化
また、顔特徴量とリンクされた属性もグラフ化

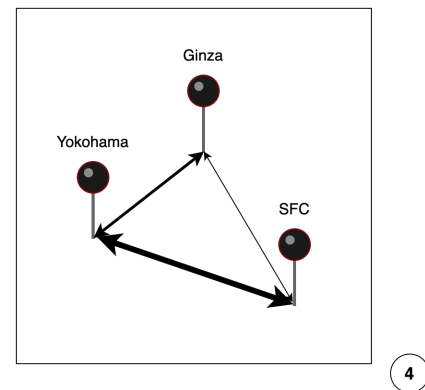
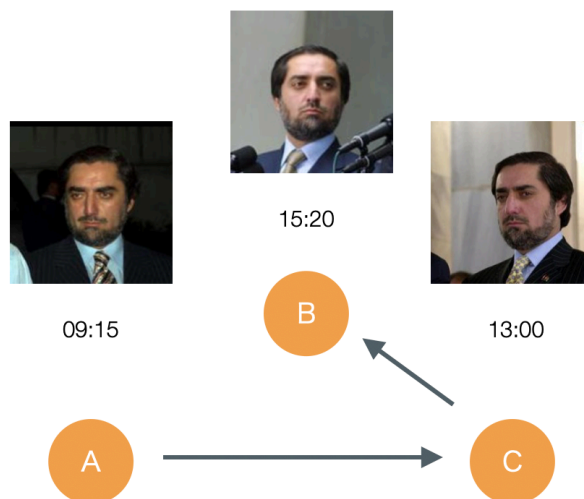


図7 解析時の処理



A~C地点で撮影された画像及び撮影時刻から、彼がA→C→Bの順で移動したことがわかる

図8 本システムにおける歩行者追跡手法

5 システム概要

本セクションでは、現在開発に取り組んでいる歩行者追跡システム（製品名称: Gingerbreadman, 以下本システム）の概要を記す。

5.1 構成

本システムのうち、サーバーサイドはマイクロサービスアーキテクチャ^{*10}を参考に、サービスの集合として構築されている。また、各サービスは Docker^{*11}を用いてコンテナ仮想化されている。

本システムの構成を図9に示す。また、各サービスの詳細を表6に示す。

なお、現時点での実際の構成設定は、Master ノードについては docker-compose.yml(CPU 版)^{*12} 及び docker-compose-gpu.yml(GPU 版)^{*13}を参照のこと。

^{*10} ソフトウェア開発手法の一つ。各機能を一つのサービスとして実装し、それらをネットワークを介して疎に結合した集合体としてまとめることで、一つのアプリケーションを構築する。

^{*11} Docker, Inc. が開発するコンテナ型仮想化技術。仮想環境の中でアプリケーションを実行することが可能になる。

^{*12} 任意提出資料 X p.14, ソースコード 4

^{*13} 任意提出資料 X p.15, ソースコード 5

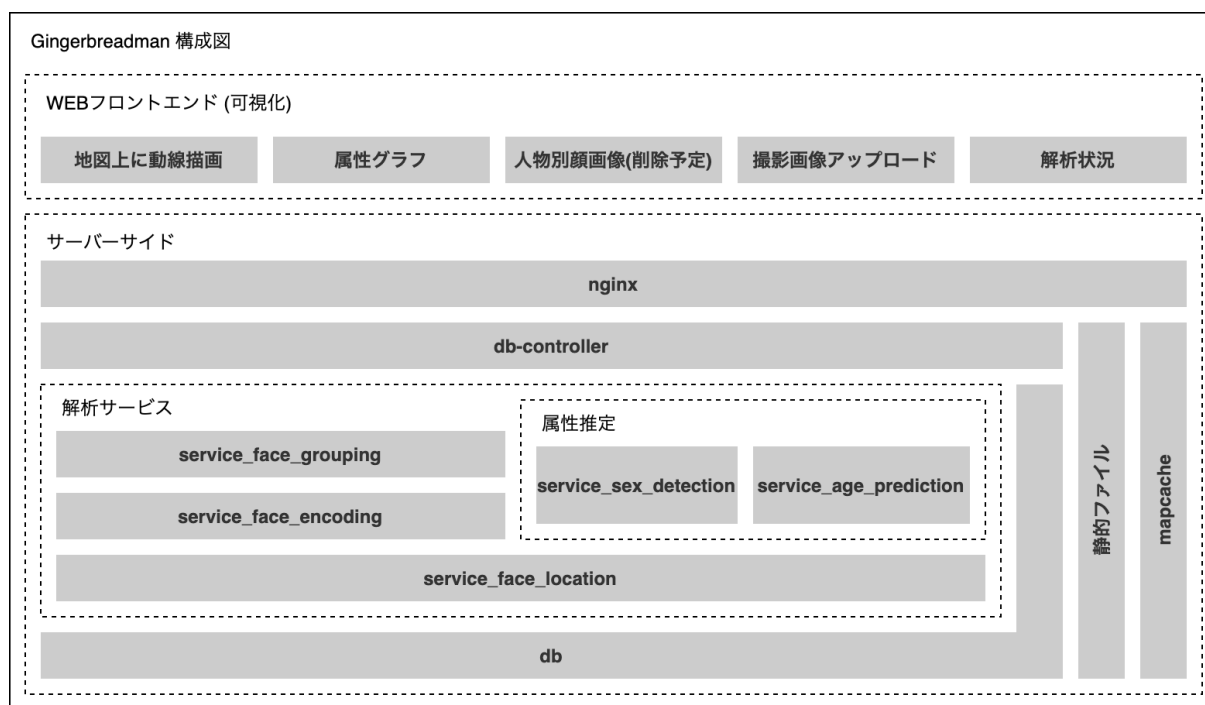


図 9 Gingerbreadman 構成図

表 6: Gingerbreadman の構成

コンテナ名	機能	詳細	対応環境
nginx	WEB サーバー	/及び/static は静的ファイル配信, /api は db-controller, /mapcache は mapcache を呼び出す.	amd64 ^{*14} /aarch64 ^{*15}
db	リレーショナルデータベース管理システム (RDBMS)	PostgreSQL を用いる	amd64
db-controller	API エンドポイント	db や各サービスとやりとりする. Django で実装	amd64
service_face_location	画像から顔の位置を検出するサービス	Flask 及び face_recognition による実装	amd64/aarch64/cuda ^{*16}

^{*14} 米国 AMD 社が開発したマイクロプロセッサの 64 ビット命令セット. 米国 Intel 社の x86 の拡張であり, 現在では Intel 社もこの命令セットを用いたマイクロプロセッサを製造している.

^{*15} 英国 ARM 社のマイクロプロセッサの 64 ビット命令セット.

^{*16} Compute Unified Device Architecture. 米国 NVIDIA 社による, GPU 向けの汎用並列計算プラットフォーム.

コンテナ名	機能	詳細	対応環境
service_face_encoding	顔画像から顔の特徴量 (128 次元) を計算するサービス	Flask 及び face_recognition による実装	amd64/aarch64/cuda
service_sex_detection	顔画像から性別を推定するサービス.	畳み込みニューラルネットワークを用いる. Keras ^{*17} [32] で実装.	amd64/aarch64/cuda
service_age_prediction	顔画像から年齢を推定するサービス.	畳み込みニューラルネットワークを用いる. Keras で実装.	amd64/aarch64/cuda
mapcache	地図キャッシュサーバー	地図タイル画像配信元である tile.openstreetmap.org に負荷を掛けないように、一度アクセスした地図タイルをキャッシュしておく	amd64

次項から、各サービスの機能を説明する.

5.2 顔座標の検出 service_face_location

このサービスでは、多様な物体が映り込んでいる一枚の画像の中から顔の位置を検出し、その座標をデータベースに保存する. 現在はプロトタイプ段階のため、face_recognition ライブラリ [33] の `face_locations` 関数を用いて顔位置の座標を検出する. `face_locations` 関数の内部では `dlib`[34] の Python API から `dlib.cnn_face_detection_model_v1` が呼び出されており、これは畳み込みニューラルネットワークを用いて顔位置を検出するものである.

処理に GPU を使用することが選択可能である.

学習結果の精度については、セクション 8.1 に示す.

5.3 顔の特徴量の算出 service_face_encoding

このサービスでは、`service_face_location` で算出された顔位置の座標から顔を切り取り、特徴量を算出しデータベースに保存する. 今回は深層学習アーキテクチャである facenet[35] を用いた. 顔の画像をネットワークに流し込むと、128 次元の特徴量が得られる. この手法は損失関数に triplet-loss を用いており、距離学習において明示的に距離を操作している特徴がある. なお、face-recognition[33] による実装を用いている. 本実装で提供されているモデルは、Labeled Faces in the Wild(以下 LFW)[36] データセットによるベンチマークにて 99.38% の精度を記録している [37].

処理に GPU を使用することが選択可能である.

^{*17} Python で書かれた、高水準なニューラルネットワークライブラリ.

5.4 同一人物の推定 service_face_grouping

このサービスでは、`service_face_encoding` にて検出した顔特徴量を用いて、同一人物と推定される顔をクラスタリングする。

クラスタリング手法として、顔のグループ化において最終的な被補足者数 (クラスタ数) が予めわからないことから、クラスタ数設定が必要ない DBSCAN[38] を用いた。実装は、scikit-learn[39] のものを用いている。パラメータとして、`eps` を 0.5 に、`min_samples` を 1 に、`metric` を `euclidean` に設定している。

精度については、セクション 8.2 に検証結果を示す。

5.5 性別推定 service_sex_detection

これらのサービスでは、アップロードされた画像及び `service_face_location` より得られた顔領域をもとに、それぞれ性別を推定する。推定後は、その情報を `db-controller` を通じてデータベースに保存する。処理に GPU を使用することが選択可能である。

5.5.1 モデルの概要

本サービスに用いられている性別推定モデルは、ResNet50[40] を元に、一部畳み込み層や全結合層を追加したものである。モデルの定義は、`services/sex_detection/model.py` ^{*18} で行っている。Keras により提供されている、ImageNet データセット [41] を用いた学習済みのモデルを利用し、後述する UTKFace データセット [42] を用いて 85epoch 転移学習した。

5.5.2 学習データセット

性別推定モデルの学習には、UTKFace データセット [42] を用いた。学習に用いた UTKFace データセットは、多様な人種と 0 歳から 116 歳の幅広い年齢層を含む、男女合わせて 23709 枚の顔写真が含まれているものである。あらかじめ顔領域のみ切り取られた画像データを用いた。

(画像のプレビューを数枚入れる)

学習結果の精度については、セクション 8.3 に示す。

5.6 年齢推定 service_age_prediction

5.7 API サーバー db-controller

このサービスでは、フロントエンドとやり取りするための API が提供されている。WEB フレームワークとして Django[43] を用いている。

^{*18} 任意提出資料 X p.129, ソースコード 112

5.8 フロントエンド

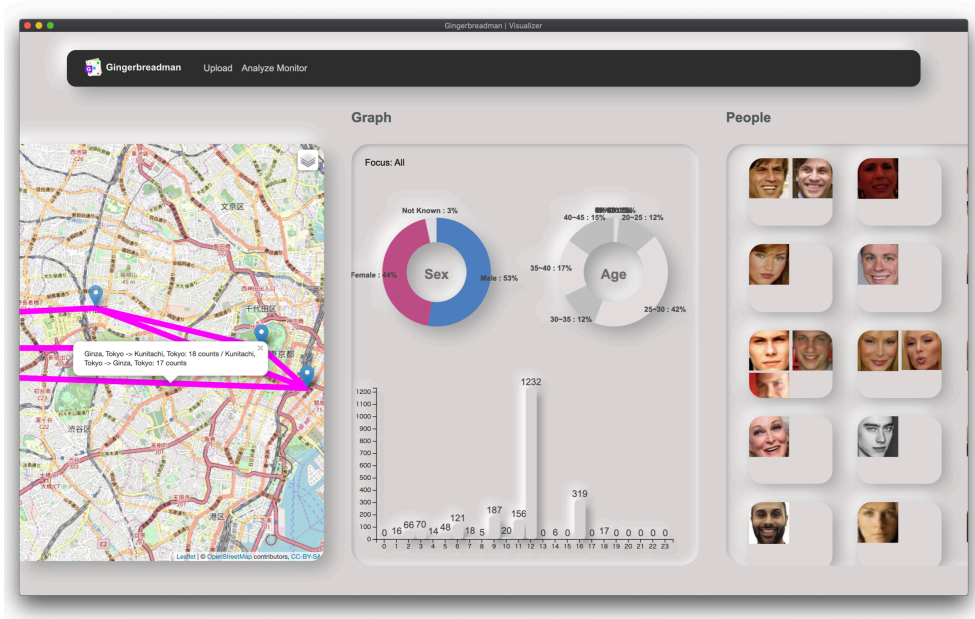


図 10 スクリーンショット

フロントエンドは、主に Elm[44], [45] を用いて、Single Page Application^{*19}として実装している。また、地図描画には Leaflet[46] を用いている。また electron[47] を使用し、デスクトップアプリケーションとしてパッケージングしている。

5.9 地図タイルキャッシュ mapcache

可視化の際に用いる地図タイルの画像は、OpenStreetMap[48] を用いている。このデータはライセンスを遵守の上で自由に利用可能であり、様々なサイトからダウンロードすることが可能である。しかし一括でダウンロードした場合容量が大きいため、最低限必要なタイル画像を tile.openstreetmap.org に逐次問い合わせを行い取得している。その際に tile.openstreetmap.org のサーバー負荷を軽減するため、キャッシュサーバーを Nim[49] で実装した。本サービスで地図タイル画像をキャッシュしており、一度アクセスした場所の画像タイルは本サービスのコンテナが稼働しているマシン上に保存されることとなっている。

5.10 分散処理

本システムを実際に活用する際には、大量の画像を解析する必要があると想定される。そこで、`service_face_location`, `service_face_encoding`, `service_sex_detector`, `service_age_prediction` においては複数のコンピュータをネットワークで繋げ、並列処理を行うことを可能としている。

本システムを起動しているマシン（以下、Master ノードとして扱う）とネットワークで繋がった他の複数台のマシンにおいて、Worker 用設定ファイル^{*20}を用いて Worker ノードを立てることができる。

図 11 に Worker ノードの構成図を、図 12 クラスタの構成図を示す。

^{*19} 単一のページから構成される WEB アプリケーション。Javascript を用いて必要な情報をサーバーから取得したり、画面更新を行う事が多い。

^{*20} 任意提出資料 X p.17, ソースコード 7

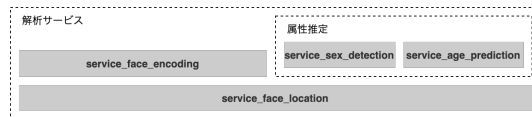
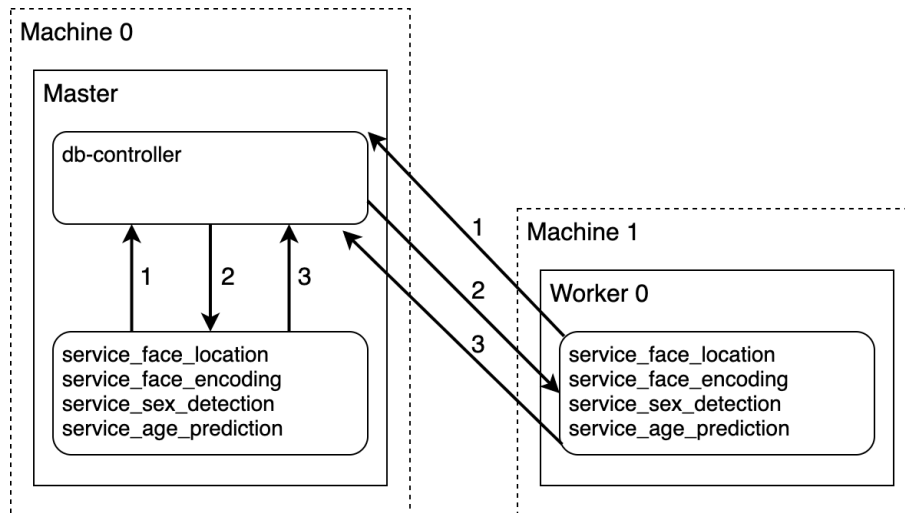


図 11 Gingerbreadman Worker ノード 構成図



- 1: 未解析のものがあるか問い合わせ
- 2: 未解析のものがあれば解析用の画像等を一定の件数送信
- 3: 解析結果を送信

図 12 Gingerbreadman 分散処理 構成図

仕組み

図 12 に示したように、各種サービスは db-controller に未解析の項目がないか数秒に 1 回確認し、あれば数件まとめて解析対象を取得し、解析して結果を db-controller に送信している。この通信は HTTP で行われているため、マシンを超えて通信を行うことで、このようなクラスタを組み処理を分散させることを可能としている。

分散処理のベンチマークは、セクション 8.4 に記している。

6 本システムの優位性

本システムは以下に示す特徴を持っており、セクション 3 で挙げた先行研究の課題を克服している。

6.1 オープンソース

本ソフトウェアはオープンソースで実装されている。ライセンスは GNU General Public License v3.0^{*21} であり、以下の項目が許可されている^{*22}。

^{*21} 任意提出資料 X p.1, ソースコード 2

^{*22} 本説明は要約にとどまり、法的拘束力を持たない。また、筆者は要約内容に責任を負わない。ライセンスの詳細については任意提出資料 X p.1, ソースコード 2 を参照のこと。

- 商用利用を含む自由な実行
- コードの自由な改変
- 自由な複製
- 自由な配布・販売
- ソフトウェア内に含まれる特許の利用

また、以下の項目が制限されている。

- ライセンス及び著作権表示を保持する必要がある
- 変更した場合、そのソースコードを公開する必要がある
- 変更・配布した場合、同一ライセンスを保持する必要がある

なお、開発者はソフトウェアを使用した上で起こる全ての出来事に対し責任を負わないし、一切保証もしない。

オープンソースであることにより生まれるメリットを、以下に示す。

透明性

オープンソースであるため、導入主体及び市民がソースコードをすべて読むことが出来る。そのためバックドアやセキュリティ上のリスク等をチェックすることが可能となり、高い透明性が担保される。

ET City Brain のようなプロプライエタリ^{*23} のサービスではソースコードが非公開のためこうした検証が難しく、導入主体はともかくとして市民レベルでは事実上チェックが不可能である。それに対し本システムはオープンソース実装のため、ソースコードレベルで透明性を担保することが出来るという明確なメリットが存在する。

またソースコードが大勢の目に触れることとなり、「十分な目玉があれば、すべてのバグは洗い出される」[50] ため安定性向上やセキュリティ対策の面でもメリットがある。

また自由に配布することで、任意のコンピュータで実行することが可能となり、情報漏えいなどに対するリスクマネジメントを柔軟に行うことができる。

利用の促進

ライセンスにより、商用を含め自由な配布や利用が認められている。そのため導入主体が無償で、あるいは企業の有償サポートを受けて利用することが容易となる。

生産性

オープンソースであり、インターネットを通じて誰でも開発に参加することが出来る。そのため、クローズドな開発体制と比べて低コストで高品質な開発を行うことが期待できる。

柔軟な変更

オープンソースのため、導入主体側で自由にソースコードを変更して用いることが出来る（ライセンス規約上、変更部分を公開する必要がある）。そのため、各導入主体の用途やニーズに柔軟に対応することが可能である。

^{*23} ソフトウェアの使用・改変・複製などを法的・技術的な方法で制限しているソフトウェア。

6.2 マイクロサービスアーキテクチャ・コンテナ

セクション 5.1 の通り、本システムはマイクロサービスアーキテクチャを参考にサービスの集合として構成されている。サービスごとに Docker コンテナで隔離され、それらがネットワークを介し疎に結合されている。

コンテナ利用のため環境構築に煩わされることがなく、再現性が高いというメリットが存在する。またプログラミング言語やフレームワークに強く依存せずシステムが構成されており、開発がスムーズに進むことが想定されるほか、利用者が容易にサービスを自前のものに入れ替え、性能向上を図ることが可能というメリットもある。

6.3 GPU・分散型による高速処理

表 6 に示したように、一部サービスでは設定ファイルを指定することで GPU(CUDA) を利用した処理が可能になっている。また、セクション 5.10 に記した通り、各サービスをマシン間に分散させ、処理の高速化を測ることが可能となっている。このように、大量のデータを高速に処理することが可能な設計となっている。

6.4 関数型言語によるフロントエンド

5.8 に記した通り、本システムの WEB フロントエンドは Elm[44], [45] を用いて記述された Single Page Application である。Elm は WEB フロントエンド用のドメイン固有言語であり、Javascript にトランスパイルできる静的型付けの関数型言語である。

Elm は副作用のない純粋関数でプログラムを組み立てるため、強力な型システムのおかげもありコンパイルが成功した時点で実行時エラーが起こらないことが保証される。また、Javascript と連携する際には Port という機能を用いて安全にメッセージのやり取りを行うことが可能となっている。これらは、本システムのフロントエンドにおける堅牢性に大きく寄与している。

また、The Elm Architecture を用いて Model, View, Update の 3 つのパターンを用いてアプリケーションを構築する。それぞれアプリケーションの状態管理・HTML による状態の表示・イベントに応じて状態を更新する機能を持つ。このアーキテクチャはシンプルであり、モジュールとして分割しやすく大規模開発に向いているといえる。

更に、Single Page Application のためページ遷移などがなめらかであり、ネイティブアプリケーションに近い操作性を提供できることも利点としてあげられる。

7 想定する利用先

本システムの活用先として、主に以下を想定している。

7.1 公共空間

以下に挙げるように、商店街のような比較的小規模なエリアから、市街地全体、さらには都市間まで、幅広い規模の都市計画に対応して分析に用いることが可能と考えられる。また国内に限らず、急速な発展を目の当たりにしている新興国の都市や、他国の衰退都市まで、幅広く活用できるシステムと考えられる。

中心市街地活性化

コンパクトシティなどを実現する上で、集約先となる地域に本システムを導入する。その上で人々の動線・属性などを把握し、人の動きを中心に据えた、データに基づいた再開発計画の立案に役立てる。

立地適正化

現在、コンパクトプラスネットワークの取り組みを進めるため、全国 522 団体で立地適正化の取り組みが行われている [51]。一例として、長野県長野市では居住誘導区域・都市機能誘導区域などを設け、緩やかに都市機能をコンパクトにしていく取り組みを行っている [52]。様々な施設等の集約過程で、次の最適な立地を選定する際に本ツールを用いて分析を行うことができる。

観光振興

セクション 1.1 に記した通り、今後は各地で人口の減少が進むことが予測されている。地域の定住人口が減少することは、一般に地域内の消費活動の縮小につながり、やがて生産活動の停滞にもつながっていく。しかし、減り続ける人口を再び増やすことは困難である。

そこで、地域外からの旅行者や短期滞在者による「交流人口」を増やすことが注目されている [53]。これを目的とした観光施策の立案・評価をする際に、本システムを用いることで、各観光施設の属性別需要や観光客の行動ネットワークを定量的に把握することが可能となる。

商店街のマーケティング

やや対象エリアを限定し、商店街のマーケティング分析に用いることも想定される。人々の動線や年齢といった属性による、立ち寄る店舗の違いなどを把握した上で、最適なマーケティング戦略の立案に役立つことができる。

公園の再開発

公園のような公共空間においても、来園者の動線を把握した上で計画に役立てることは重要である。例として、かつて治安が悪く犯罪行為の温床ともなっていた福岡市警固公園では、再開発事業の際に図 13、14 のように新旧公園の動線および利用実態を詳細に計測している。その上で、にぎわいの再生を図る計画のもとで再開発を行い、実際に多くのにぎわいを生み出していることが確認されている [16]。

この動線および利用実態の調査は、図 15 のように人手で行われているようである。これを本システムによって自動化することで、効率化及び精度の向上を測ることができるだろう。

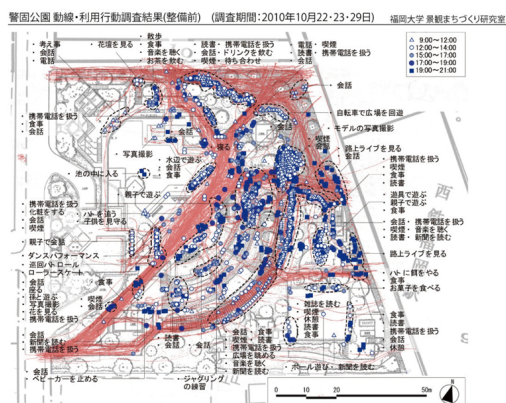


図 13 旧警固公園の動線・利用実態調査の結果 (引用: [54])

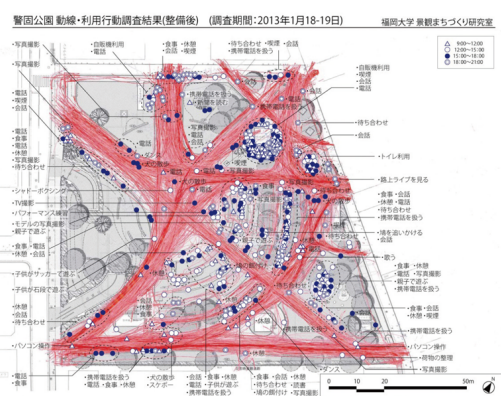


図 14 再整備後の警固公園の動線・利用実態調査の結果 (引用: [54])

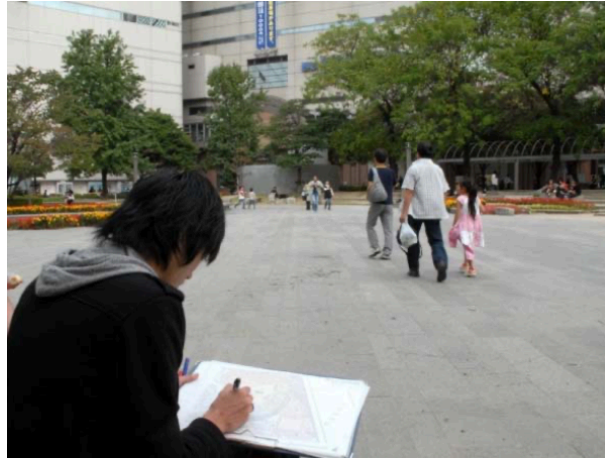


図 15 動線および利用実態調査風景 (引用: [55])

7.2 民間

本システムの開発に至った目的は、セクション 1 の通りコンパクトシティの実現に向けた都市計画の最適化である。しかしこのシステムは、民間施設などにも活用できるものと考えられる。

イベントブースの最適化

大規模イベントなどにおいて、会場における来場者の動線及び属性を把握することで、各ブースの配置を最適化することができると考えられる。

例えば、今回のイベントの解析結果を踏まえ、次回以降は似た属性の人々が訪れやすいブースをまとめて配置するといった施策が可能となる。このような最適化が進めば、イベントの売上や満足度など主要な KPI の向上に、大きく寄与できるものと考えられる。

大規模商業施設内のテナント配置最適化

前項のイベントブース最適化と同様に、施設内における来場者の動線および属性を把握することで、テナントの配置を最適化することができると考えられる。似た属性を持つ人々の訪れやすいテナントを把握し、近接させるといった取り組みを行うことができるだろう。同様の、民間商業施設にむけたソリューション [28] はセクション 2.3 にて触れた通りすでに存在する。しかし、本システムは外部企業の手を借りずとも簡単に自分たちで導入・改変できるため、導入しやすさや利便性の点でメリットがあるといえる。

出店計画立案

商業店舗の新規出店などを計画する際、人通りのある道に面しているか、ターゲットの客層が多くいるかなどを把握し分析することは必須である。そこで、匿名化等を行った上で本システムを公開運用し、だれでも自由にアクセスできる状態にする。そして各企業が本システムの分析を用いれば、長期的な目線で見た場合、各店舗の立地が現在より最適化されることとなるだろう。

また、日本再興戦略 [56] においても、「民間投資の喚起を軸とする中心市街地活性化を図る」と盛り込まれており、民間企業が自発的に立地の最適化を進めていくことができれば、最終的にコンパクトシティの実現にも繋がると考えられる。

8 性能評価

8.1 顔検出精度評価

セクション 5.2 に記した顔座標検出サービスの精度を検証した。使用したデータセットは WIDER FACE^{*24}[57] の validation 用データ (計 39,708 個の顔が含まれる) である。

検出率の結果は、60.92% であった。

8.2 クラスタリング精度評価

セクション 5.4 に記した `service_face_grouping` による、同一人物推定の精度を LFW を用いて検証した。手順は以下の通りである。

1. 図 17 のような、LFW データセットの validation 用画像 (5,749 人分、一人あたり 1 枚以上の顔写真) を用意する
2. `service_face_encoding` にて、特徴量を算出する
3. `service_face_grouping` にて、クラスタリングを行い同一人物を推定する

結果を表 7 に、その解説図を図 18 に示す。また表 7 及び図 18 中において、各用語を次のように定義した。そして用語の具体例を図 16 に示す。

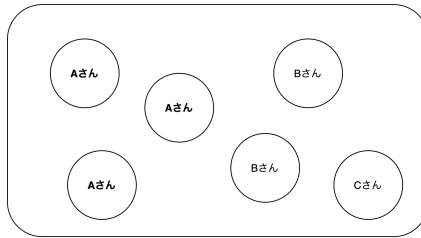
- 不明クラスタ
生成されたすべてのクラスタのうち、クラスタ内に異なる人物の顔が複数人内包されており、最も出現数が多い人物の顔がクラスタ内の 7 割を占めていないクラスタ。そのクラスタの個人の特定が困難であることから、不明クラスタとした。
- 有効クラスタ
生成されたすべてのクラスタから、不明クラスタを除いたもの。クラスタ内において最も出現数が多い人物の顔がクラスタ内の 7 割以上を占めており、その人物のクラスタとする。
- 平均混在率
有効クラスタのうち、一部別人の特徴量が同一人物として混じっているものがある (有効クラスタの定義上、全体の 3 割未満は別人の特徴量が占めている可能性がある)。その混在率をクラスタ毎に取り、有効クラスタ全体の平均をとったもの。
- 重複数
有効クラスタのうち、重複した人物のもの数。例えば、X さんが 3 つのクラスタに分かれて生成されているといった現象の総件数。

^{*24} 多様なポーズ、角度、障害物を含んだ 32,203 枚の画像に、計 393,703 個の顔が含まれている。

不明クラスタ

最も出現数が高いAさん(3回)の顔が、全体の7割を占めていない。

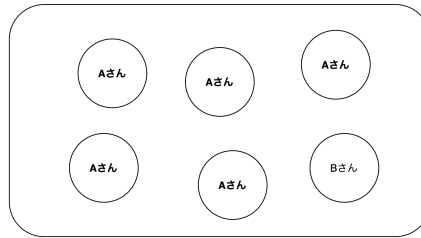
(Aさんはクラスタ内の50%)



有効クラスタ (Aさんクラスタ)

最も出現数が高いAさん(5回)の顔が、全体の7割以上を占めている

(Aさんはクラスタ内の約84%)



平均混在率

有効クラスタのうち、別人が混じっている割合。

上記のAさんクラスタであれば、中にBさんが混在しており、その混在率は約17%である。

各有効クラスタの混在率の平均が、平均混在率となる。

```
sum = 0
for cluster in cluster_list:
    混在率 = length(others(cluster)) / length(cluster)
    sum += 混在率
平均混在率 = sum / length(cluster_list)
```

clusterは顔特徴量の、cluster_listはclusterの集合である。
lengthは集合の要素数を返す関数である。
othersはclusterのうち、本人以外の人物の要素の集合を返すものである。

図 16 各用語の具体例

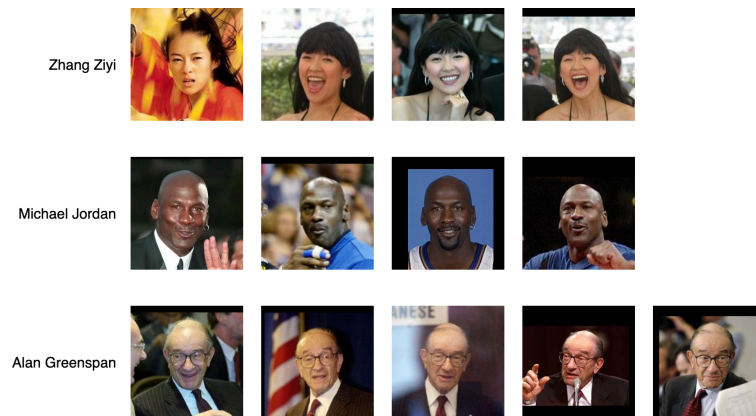


図 17 LFW データセットのサンプル (引用: [36])

表 7 クラスタリング精度の検証結果

項目	結果	割合
クラスタ数	5,220 個	総定数の 90.82%
有効クラスタ数	3,517 個	クラスタ数の 67.38%
平均混在率		1 クラスタあたり 1.23%
重複数	246 個	有効クラスタの 6.99%

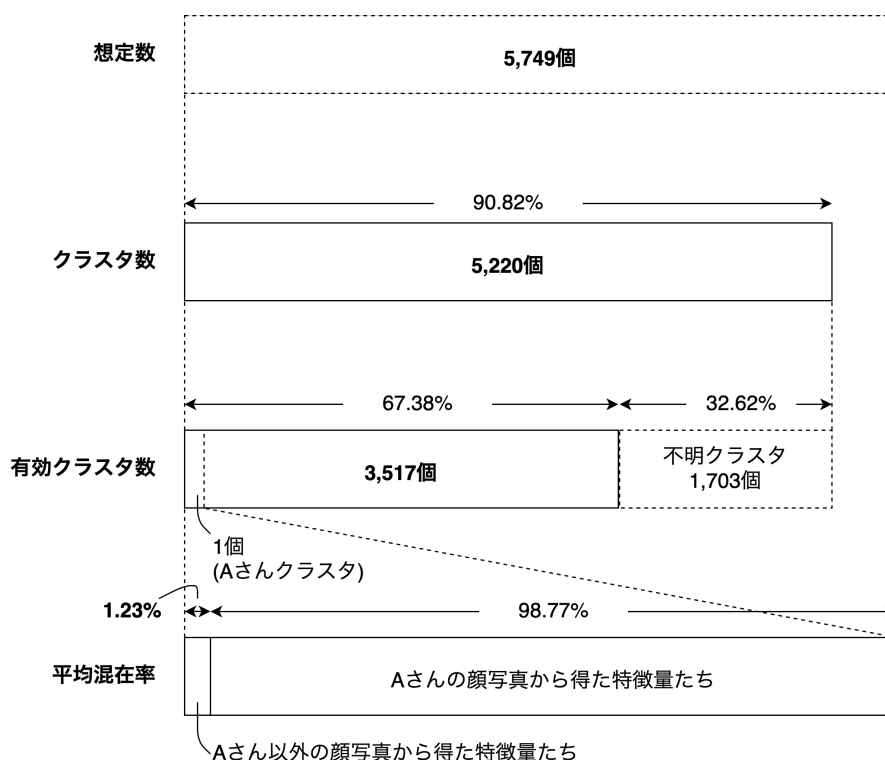


図 18 クラスタリング精度の検証結果

以上の検証結果より、不明クラスタが有効クラスタのうち3割以上を占めており、十分な精度があるとは言えない状況である。クラスタ数に関しては、おおよそ適当な精度であると考えられる。また平均混在率は極めて低く抑えられている一方で、同一人物のクラスタが重複して生成されるといったケースも少なからず見られ、しきい値設定のありかたを検討する必要がある。今後、顔特徴量抽出モデルの改良やクラスタリング精度の向上が課題となる。

今回は LFW を用いて検証したが、このデータセットは白人に偏ってはいるものの、図 17 のように多くの人種が含まれている。しかし日本国内に住む外国人は 2019 年 1 月時点で総人口のうち約 2% 程度 [58] であり、そこに観光客を加味しても本システムに補足されるであろう顔の大多数は、日本人のものとなることが予想される。そのため、実際に運用する際には本検証結果と比べ、精度が著しく低下するおそれがある。また、オープンソースであることから海外での活用も想定され、その際には各地でも同様に、被補足者の人種の偏りが生まれることが想定される。そのため、顔特徴量抽出モデルやクラスタリングの際のしきい値に対して、ローカライズという観点も必要となると考えられる。

8.3 性別・年齢推定精度評価

UTKFace データセットのうち、学習に用いなかった画像 541 枚を用いて、正解率 (binary accuracy) を計測した。性別推定の精度検証結果は、91.33% である。また、学習データの結果は 98.73% であったことから、大幅な過学習は起きていないと考えられる。また、年齢推定の精度検証結果は、平均誤差 9.1 歳である。また、学習データの結果は 8.9 歳であったことから、こちらも過学習は起きていないと考えられる。

8.4 分散処理ベンチマーク

セクション 5.10 で述べた分散処理を、実際に複数台のコンピュータをネットワークで連結し実施した。

表 8 に、分散処理に用いたコンピュータ環境を記す。なお、それぞれのコンピュータはギガビット・イーサ

ネット対応スイッチングハブ (TP-Link TL-SG105E) 及び CAT7 の LAN ケーブルを介して MacBook Pro に接続されている。また、同表中のリンク速度は TCP プロトコルを用いたデータ転送速度から算出したものであり、iperf[59] を用いて計測している。

表 8 分散処理の概要

コンピュータ名	チップ	メモリ容量	MacBook Pro との リンク速度
MacBook Pro	CPU : Intel Core i7-7567U 3.5~4.0GHz 2 Core/4 Thread	LPDDR3 16GB	-
Jetson Nano 0	CPU : ARM Cortex-A57 1.43GHz / GPU : Nvidia Maxwell 128 Core	LPDDR4 4GB (CPU・GPU 共用)	907 Mbits/sec
Jetson Nano 1	〃	〃	913 Mbits/sec

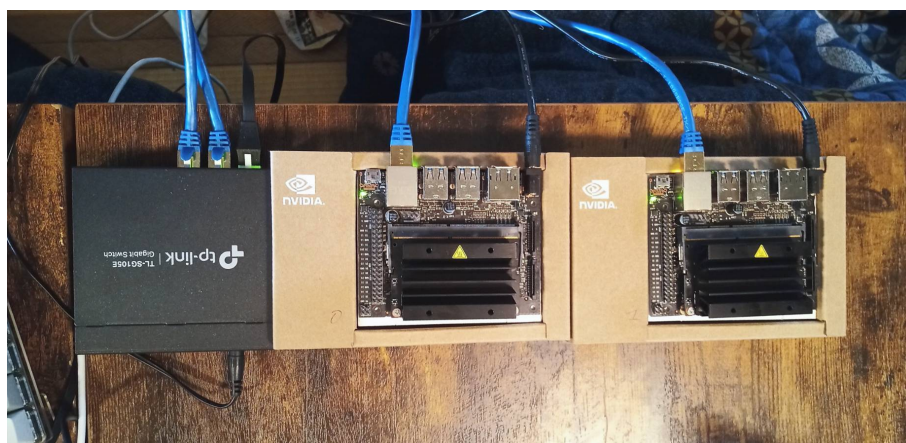


図 19 分散処理の風景

本ベンチマークにおいては、4597 枚の顔画像 (service_face_location の結果生成されたもの) を用いて、各サービスごとコンピュータの接続数別に処理時間を計測した。なお、設定ファイルは docker-compose.yml^{*25} (MacBook Pro) 及び docker-compose-worker-arm-gpu.yml^{*26} (Jetson Nano) を用いた。

以下表 9 に、その結果を示す。

表 9 分散処理ベンチマークの結果

サービス名	MacBook Pro 単体	左記 + Jetson Nano 0	左記 + Jetson Nano 1
service_age_prediction	13 分 39 秒	9 分 41 秒	7 分 1 秒
service_sex_detection	12 分 31 秒	8 分 51 秒	7 分 19 秒

結果より、分散処理を行うことにより処理時間が短縮できることを実際に示すことができた。予算の都合上同一の性能を持つコンピュータが Jetson Nano2 台しか存在しないため、台数を増やした場合に処理時間のグラフがどのような線を描くのかは検証できていない。

^{*25} 任意提出資料 X p.14, ソースコード 4

^{*26} 任意提出資料 X p.17, ソースコード 7

第 III 部

課題と利活用のあり方

第 II 部で開発したシステムには、改善すべき課題がいくつかある。第 III 部では、これらの課題及びその改善方法を示す。

また、本システムは個人追跡が行われることから、開発・使用にあたってはプライバシー侵害などの問題を考慮する必要がある。そこで、プライバシーに配慮した利活用のあり方について考察を行った。

9 今後の課題

本研究の今後のロードマップは、次のようになる。

1. 明らかになった課題を克服する
2. 都市計画に必要となるデータとはなにか調査し、それを可視化する
3. デザインを改良し、また 2 も合わせて UX を改善する
4. プライバシー保護の観点から、実証実験などを行う際に必要な対策を考える
5. 実証実験を重ね、そこで明らかになった課題の改善を進める

本セクションでは、セクション 8 までに記した本研究の成果や、また研究を進めていく過程から明らかになった課題を記す。その上で、今後取り組むべき内容を示す。

9.1 プライバシー保護

9.1.1 問題点

現在、便宜上個人の顔も可視化している。しかしながら、各計測地点に設置する定点カメラで顔写真を撮影し、データベースに保存すること、またそのデータを外部に提供することは、不正利用のリスクを生じさせる。不正利用は流出によって起こるだけでなく、分析を担当する団体の内部の者により引き起こされることも考えられる。たとえば、分析を担当する自治体・団体の中に被補足者と社会的つながりがあるものがおり、上記のような被害を起こすケースは十分に考えられる。

具体的には、以下 5 種類の被害が想定される (引用: [60], 一部改変)。

- 特定
ある個人と一意に結びつく情報が取り除かれ、匿名化・仮名化されたデータについて、それを該当する個人と再度結びつけること。
- 連結
ある個人に関するデータを、同一人物に関する他のデータと結びつけること。特定の有無に関わらず起こり得る。
- 属性推定^{*27}
ある個人に関するデータの一部が削除、あるいは抽象化されているとき、それを復元あるいは推定すること。特定の有無に関わらず起こり得る。
- 連絡

^{*27} 本システムの性別・年齢推定と異なる。

ある個人に関するデータを入手した者が、何らかの手段でその個人に電話・郵便・メール、あるいはその他の手段でコンタクトを取ること。

- 直接被害

ある個人に関するデータを入手したものが、その個人に直接的な被害を与えること。ストーキングなども含まれる。

9.1.2 今後の方向

セクション 9.1.1 で示した問題を解決するため、分析担当者、外部の第三者といった立場に関わらず、人間が非匿名化情報にアクセスできないようにする必要がある。技術的に不正利用を行うことができないシステムの構築を目指す。

そこで、データを取得した時点で十分な匿名化・仮名化などの処理を行う必要がある。具体的には、図 20 のように、以下の対策を実装する。

- エッジ推論

顔画像を撮影後、一度保管し、本システムで分析することは、流出及び不正利用に対する懸念が残る。そこで、顔特徴量算出モデル・属性推定モデルをカメラに載せ、エッジ推論を行い顔特徴量のみを取得できる「顔特徴量・属性センサ」を作成していく。本センサでは、撮影後すぐに特徴量や属性推定を行い、得られたデータを暗号化する。その後ネットワークを介し、暗号化済みデータを本システムに送信するようにする。

エッジ推論基盤の選択肢として NVIDIA 社の GPU 搭載 SBC^{*28} である Jetson Nano[61] や、TPU, FPGA といったものがあり、それらとカメラ基盤を用いた顔特徴量センサを今後開発していく予定である。

なお、外見上通常のカメラデバイスなのか顔特徴量・属性センサかの判別がつきづらいことが予想される。そこで、視覚的にわかりやすいデザインにすることが求められるだろう。

- 秘密計算

顔の特徴量データには、流出・不正利用された際において特定・属性推定のリスクがある。そこで、前項のエッジ推論を行った上で、得られた特徴量を暗号化して本システムに送信する必要がある。また、各処理にて入力を暗号化したまま計算が可能な秘密計算技術を用いることで、安全性を高める。

今後

エッジ推論 + 秘密計算

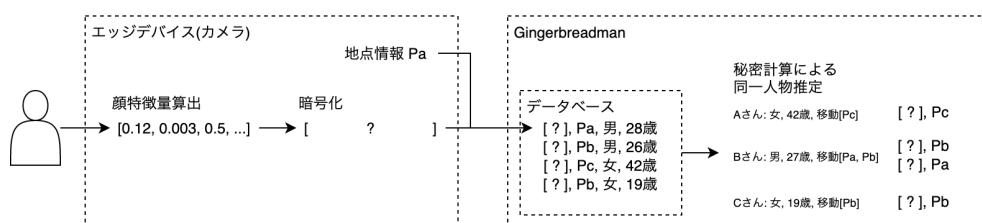


図 20 今後のシステムの設計

データを取得した時点から、流出セーフ・公開セーフな状態を一貫して保つことのできるシステムを目指す。

^{*28} Single Board Computer の略。1 枚の基板上に CPU や周辺機器が搭載された小型のコンピュータ。おおむねパーソナルコンピュータと同等の機能を備えていることが多い。

9.2 解析精度

9.2.1 問題点

セクション 8 に記したとおり、画像内における顔領域検出や同一人物推定の精度が十分とは言えない。

9.2.2 今後の方向

最新の機械学習手法を取り入れることで精度を高め、実用可能なシステムへと磨き上げる必要がある。

- 顔位置検出精度

YOLO v3[62] などの最新の顔検出モデルを組み込むことで、検出精度の改善を図る。

- 同一人物推定精度

現在は顔特徴量抽出モデルとして Facenet を用いているが、今後は最新の深層距離学習モデルである ArcFace[63] などを組み込み、制度の改善を図る。

また、各市街地に応じて人種・年齢といった属性の分布を調べ、それに合わせた学習・パラメータ設定を行うことで精度を高めることができる可能性がある。

9.3 高速解析

9.3.1 問題点

実際にシステムを導入する際、画像アップロード時に多数の画像を一度に解析する必要がある。また、ツールでクラスタリングする際も、無数の顔から数万以上の顔特徴量から同一人物を推定し、追跡する必要があると考えられる。その際に現状のシステムでは処理に時間がかかり、十分なユーザエクスペリエンスを提供できないと考えられる。現在でも、クラスタリング時に顔特徴量が数千個以上ある場合、処理に数秒～十数秒程度かかることがある。そこで分散処理のシステムを改良し、高速化を図る必要がある。

9.3.2 今後の方向

アムダールの法則

プログラムによって並列化できる部分の実行時間の割合を P としたとき、 N 個のプロセッサを用いたときの性能向上比 $S(N)$ は式 1 となる。これはアムダールの法則 [64] と呼ばれる。

$$S(N) = \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{N}} \quad (1)$$

ここで、 $1 - P$ はプログラムのうち並列化できない部分 (ボトルネック) の実行時間の割合である。

プロセッサ数を無限大に増やした極限では、性能向上率は式 2 となる。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S(N) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{N}} = \frac{1}{1 - P} \quad (2)$$

つまり、プロセッサ数を増やすことによる性能向上率には限界があり、ボトルネックの実行時間に依存することになる。そこで、可能な限り並列化をした上で、並列化できないボトルネックの処理を最適化していくことが必要となる。

代表的なボトルネックとして、ネットワークがある。現在は `service_sex_detection` 及び `service_age_prediction` において一部ネットワーク通信の処理を非同期化している。しかし大きな効率改善には至っていないため、スレッド並列のプログラムを作成し、GPU による計算中に別スレッドで画像取得・前処理を行う機構を実装する。なお、Python は Global Interpreter Lock(以下 GIL)[65] の制約から、IO を除き一度に Python のバイトコードを実行するスレッドは一つだけであることが保証されている。そ

のためマルチスレッド処理を記述しても実際は十分に並列化がなされない。そこで、GIL 制約のない言語でマルチスレッド処理を実装し直す必要があると考えられる。なお、マルチプロセスによる並列化はメモリコピーが発生することから効率的とは言えない。

また環境に応じて、CPU 推論可能な MobileNetV3[66] などの軽量の Deep Learning モデルを採用することで、速度の高速化を目指す。

更に、同一人物推定時に用いているクラスタリング手法である DBSCAN を、酒井ら [67] のマルチコア CPU 上での並列処理手法を参考に、マシン間並列処理に対応させる。

また同一の検索条件かつ新規顔追加がない場合に限り、キャッシュ機能などを実装し高速なレスポンスを実現させる。

9.4 ユーザエクスペリエンス

9.4.1 問題点

現時点では、ユーザエクスペリエンス (以下 UX) について十分な検討を行うことなく本システムを構築している。そのため、使いやすく親しみやすいシステムとして完成されているとは言えない。本システムを世界中で活用するために、誰でもスムーズに操作でき、容易に意思決定に繋げることの出来るインターフェイスを備える必要がある。

9.4.2 今後の方向

本システムの UX を改善していく際に、ユーザによる評価を収集し改善を図る必要があると考えられる。UX は製品入手前からサービスを使い終わるまでの包括的な経験を考慮するものである^{*29} ことから、複数のタイミングで評価を実施する必要がある。そうして得た評価を元に、継続的にインターフェイス・レスポンスを改善していき、ユーザ体験を高めていく。

9.4.3 改善プロセス

UX を考慮した本システムの開発サイクルとして、黒須の提唱する、図 21 に示すようなデカゴンモデル [68] を用いる。図のうち、①企画 から ⑥ 評価・検査までがデザイン (設計) に相当する。本システムはソフトウェアにより構成されるため、コーディング作業が ⑤具現化 及び ⑦製造 などに相当すると考えられる。また商用ソフトウェアではないため、現時点では ⑧宣伝・広告 及び ⑨物流・営業・販売 について本項では考えない。

^{*29} ISO 9241-210:2010(JIS Z 8530:2019) にて、「使用前, 使用中及び使用後に生じる」と、人工物を利用したタイミングだけでなく、その前後を含めることが記されている。

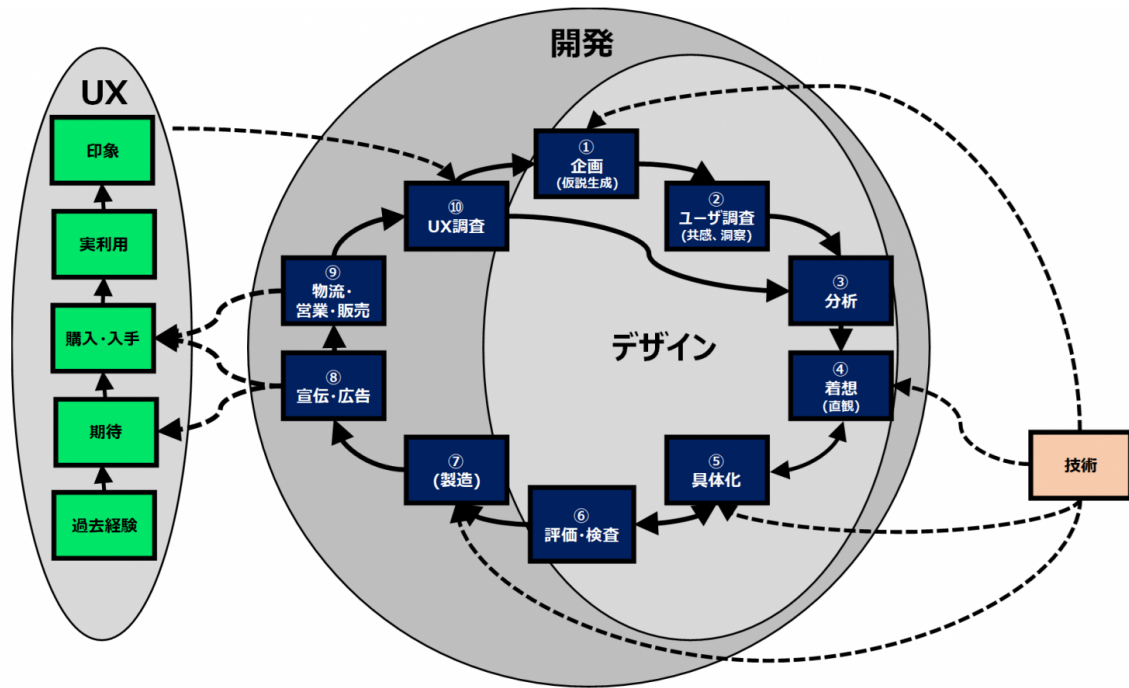


図 21 デカゴンモデル (引用: [68])

本システムでは、既に問題発見をした上で、企画を行った。その後、すぐにプロトタイプの実装に入ったことが特徴である。そのため、②ユーザ調査 やその結果の分析 (③) などを飛ばして直感的に ④着想 に入り、プロトタイプを作成した。そのため、現在地としては ⑤具現化、及び ⑥評価・検査 の段階である。本セクションでは、⑤具体化 以降の項目について、それぞれ今後行うべきことなどを列挙する。

⑤具体化

実際にプロトタイプを作成し、サーバーサイドも含め大まかな設計・デザインが完成した。

今後は、更に 9.1.2 に示したように、「顔特徴量・属性センサ」のプロトタイプも作成する。また、秘密計算技術も盛り込んだプロトタイプを作成する。

⑥評価・検査

実際にプロトタイプを動かし、性能評価を行うことで、技術的課題などが明らかとなった。また、「顔特徴量・属性センサ」を実装したり秘密計算なども盛り込んだ段階で、それぞれの性能評価も行っていく必要がある。

⑩UX 調査

実際に、ユーザに本システムを使用してもらい、セクション 9.4.4 に記す評価法を用いて UX を調査する。調査後は、そこから③分析などに戻る。③分析では、ユーザが求めるものを洗い出し、今後の改善に繋げていく。

9.4.4 評価法の導入による継続的改善

図 21 における⑩UX 調査では、やみくもに UX のよし悪しなどを調査するのではなく、評価法を導入して調査をスムーズに行う必要がある。本セクションでは、調査の際に有用であろう手法について、調査を行う段階に分けて紹介する。

まず、UX 評価はタイミングに応じて次の 5 種類が挙げられる (参考: [68])。

- 事前予測

製品の導入前の段階で体験を予測すること。

代表的なものに Izard らによる DES(Differential Emotions Scale) がある。これは、なにかを経験している最中のことを連想させ、どの程度それぞれの情動を感じるかを評価させる手法で、怒り・軽蔑・嫌悪・悲観・恐怖・罪悪感・興味・喜び・恥・驚きの 10 種類について 5 段階評価を求めるものである。ユーザの想像には限界があり、予測の妥当性は限定される。

- 短期的評価

製品を導入した時点、あるいは少し使ってみた程度のタイミングで体験の評価を求めること。

使い始めた段階のワクワク感や当惑が評価に影響を与えるため、短期的評価を一度実施する限りでは十分な信頼性を持たない。しかし体験は薄れゆくものであるため、UX 白書 [69] における「経験の累積」という観点から任意の時点での評価を積み重ねる必要がある。

代表的な手法として、Hassenzahl らによる AttrakDiff[70] と呼ばれるものがある。表 10 に示すように対となる意味の形容詞のペアに対してそれぞれ 7 段階の評価を求めるもので、Semantic Differential Method の一つである。

この手法では、品質を実用的品質 (Pragmatic Quality, 以下 PQ) と感性的品質 (Hedonic Quality, 以下 HQ) に区別して測定する。

表 10 AttrakDiff の評価尺度 (一部)

PQ	実用的でない	5	4	3	2	1	実用的である
	結果が予測不能な	5	4	3	2	1	結果が予測可能な
	複雑な	5	4	3	2	1	単純な
HQ	退屈な	5	4	3	2	1	魅惑的な
	格好悪い	5	4	3	2	1	格好いい
	品質が悪い	5	4	3	2	1	品質が高い

- リアルタイム評価

ユーザがシステムを使用している段階でリアルタイムに評価を求めること。記憶に頼ること無く評価を得ることができるが、ユーザの活動中に割り込んで評価を行う必要があることから、頻繁に行うことは難しいとされている。

代表的な手法として Larson らによる ESM があり、これはポケットベル^{*30}を用いてユーザを製品を利用している最中に呼び出し、そのタイミングで質問を行う方法である。

- 準リアルタイム評価

前項のリアルタイム評価がユーザの活動に立ち入ることになってしまい調査が難しいことから、一日程度のスパンで評価情報をまとめて入手するもの。

共通しているのは自己記述的であるということ。自己記述的であることとは、「間隔条件的」「刺激条件的」「イベント条件的」の 3 種類に大別される。「間隔条件的」とは、所定の時間が来たら回答するものである。代表的な手法として、ダイアリー法などがある。「刺激条件的」とは、所定の合図が来たら回答するものである。ESM・EMA 法などがこれに該当する。「イベント条件的」とは、特定の出来事が発生したら回答するものである。

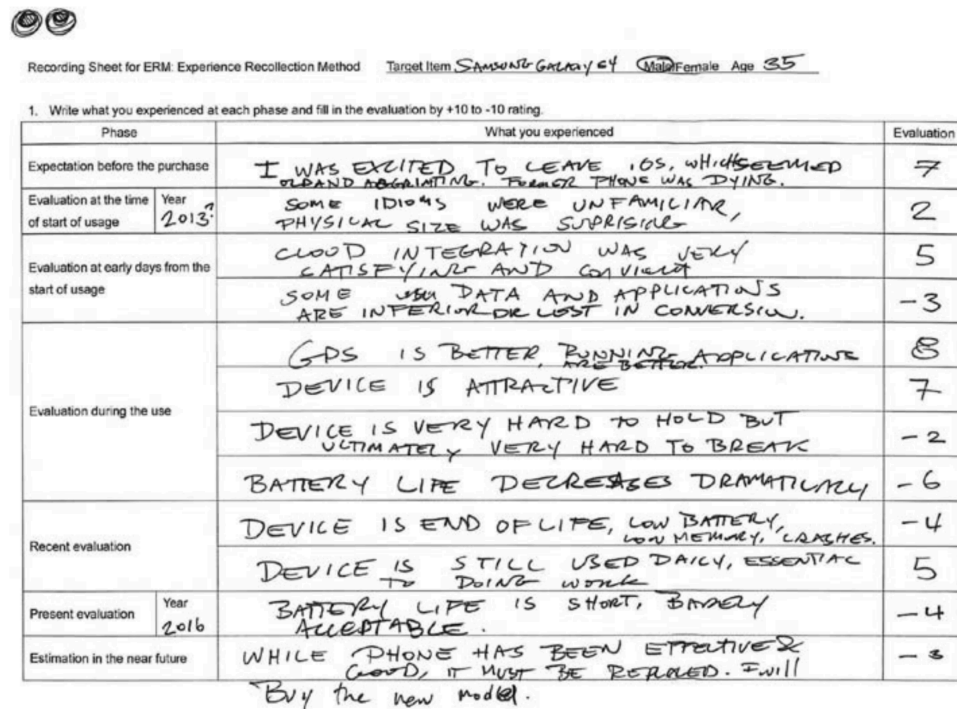
- 長期的評価

前項までに述べたリアルタイム評価も準リアルタイム評価も、調査のタイミングに限定された評価情報しか得られないことに注意する必要がある。そこで、ユーザが製品やサービスを長期間、継続的に、あるいは反復的に利用している場合に、適当な時期に過去を振り返って経験を評価してもらう。

^{*30} 現代であれば携帯電話やチャットソフトウェアなど、任意のリアルタイム双方向通信が可能な機器を用いればよいだろう。

ただし、時間の経過とともに経験値は大きく変動することがあるため、数値的な評価だけでなく言語を用いた記述的な評価をもらうことが必要となる。

手法のひとつとして、Experience Recollection Method(ERM)がある。ERMでは、利用前の期待の時期・利用開始時期・利用開始後間もない時期・その後の利用期間・つい最近の時期・現在・近い将来の予測という7つの時間に分けて評価を記入してもらう。記入例を、図22に示す。



Recording Sheet for ERM: Experience Recollection Method Target Item Samsung Galaxy S4 Male/Female Age 35

1. Write what you experienced at each phase and fill in the evaluation by +10 to -10 rating.

Phase	What you experienced	Evaluation
Expectation before the purchase	I WAS EXCITED TO LEAVE IOS, WHICH SEEMED BRAND NEW. BUT MY PHONE WAS DYING.	7
Evaluation at the time of start of usage	SOME IDIOMS WERE UNFAMILIAR, PHYSICAL SIZE WAS SURPRISING.	2
Evaluation at early days from the start of usage	CLOUD INTEGRATION WAS VERY SATISFYABLE AND CONVENIENT.	5
	SOME APP DATA AND APPLICATIONS ARE INTERFERED OR LOST IN CONVERSION.	-3
Evaluation during the use	GPS IS BETTER, RUNNING APPLICATIONS ARE BETTER.	8
	DEVICE IS ATTRACTIVE	7
	DEVICE IS VERY HARD TO HOLD BUT ULTIMATELY VERY HARD TO BREAK	-2
	BATTERY LIFE DECREASES DRAMATICALLY	-6
Recent evaluation	DEVICE IS END OF LIFE, LOW BATTERY, LOW MEMORY, LAGGIES.	-4
	DEVICE IS STILL USED DAILY, ESSENTIAL TO DOING WORK	5
Present evaluation	BATTERY LIFE IS SHORT, BARELY ACCEPTABLE.	-4
Estimation in the near future	WHILE PHONE HAS BEEN EFFECTIVE & GOOD, IT MUST BE REPLACED. I WILL BUY THE NEW MODEL.	-3

図22 ERM 実施例のサンプル (引用: [71])

こうした手法を用いて各期間に置いて UX 調査を行い、そこから得たデータを定量的・定性的に分析し、UX 改善に務めることが必要となる。

ユニバーサルデザインの7原則

本システムは、「誰にでも」使いやすいシステムであることが望ましい。そのために、様々な身体的特徴や知識レベルのユーザーを想定して開発する必要がある。

そのため、「ユニバーサルデザインの7原則」[72]に則り UX をデザインする必要があると考えられる。この原則は、以下の通りである。

- 公平性
- 柔軟性
- 直感的
- 知覚的
- 失敗に対して寛大
- 身体的な努力を少なくする
- 大きさと空間の余裕

また、上記の原則に則った上で、各種障碍のケースなどに応じて可能な限り個別の対策を取ることも必要となる。JIS X 8341-3 ^{*31}などを参考に、アクセシビリティを最大限高めていく必要がある。

9.5 拡張性

9.5.1 問題点

多様な活用先において、本システムがデフォルトで提供する機能だけは、すべてのユーザの需要を満たすことは難しいと考えられる。

9.5.2 今後の方向

本システムのソースコードを改変することなく容易に任意の機能を追加できるよう、モジュールを組み込める機構を実装したい。

10 利活用のありかた

10.1 問題点

個人追跡を行行情報を収集することは、市民に心理的負荷をかけることとなる。そこで本システムを実証実験や実際に導入する際の利活用のあり方を模索し、また市民との合意形成を円滑に行う手法を検討していく必要がある。

10.2 事例 大規模複合施設における ICT 技術の利用実証実験

スマートシティ化に関わる個人追跡技術などの実用化に向けた動きは、各地で始まっている。そうした状況下で、3.2 で示したような、不正利用に対する懸念も高まりつつある。情報通信研究機構（以下、NICT）が 2014 年に実施した「大規模複合施設における ICT 技術の利用実証実験」においても、そうした懸念が高まり、最終的に実験は延期^{*32}された。この実験は本研究内容と共通する部分が多いため、紹介する。

10.2.1 概要

NICT は、2014 年に JR 大阪駅の商業施設・公共空間である大阪ステーションシティにて、「大規模複合施設における ICT 技術の利用実証実験」を計画していた。これは 2 年間に渡り空間内にて個人追跡などを行い、人々の動きを取得し、災害時の避難誘導などの安全対策の検討に活用するというものであった [74]。

この実証実験の特徴として、カメラデバイスにおいて画像撮影時に即時人物の特徴量抽出を行うことが挙げられる。この際、顔を含む生の画像が揮発性メモリ上に最大 10 秒保存されるにとどまるため、特定の個人を視覚的に識別できない形でデータを取得することが可能である。検出された特徴量は、NICT 内の設備に転送され、統計処理が施され人流統計情報が算出される。

また、NICT は JR 西日本らとの間で、同社の求めがあれば「実験で取得したデータを分析した結果得られた特定の個人を識別することができる情報を含まない情報について、法律その他の法令等に照らし問題ない範囲内で、無償で提供しなければならない」との契約を結んでいる [75]。

これに対し、個人情報・プライバシー保護の観点から批判的な報道がなされた。また、2014 年 3 月には伊藤

^{*31} 正式名称は「高齢者・障害者等配慮設計指針—情報通信における機器、ソフトウェア及びサービス—第 3 部：ウェブコンテンツ」である。高齢者や障害のある人を含む全ての利用者が、使用している端末、ウェブブラウザ、支援技術などに関係なく、ウェブコンテンツを利用することができるようにすることを目的として制定されている [73]。

^{*32} その後、実施はされていないようである。

成彦中央大学教授らによる「監視社会を拒否する会」が中止を求める要請書を提出するなど、批判が巻き起こった。その後、NICT はこうした懸念の声を受け、実証実験の延期を発表した [76]。

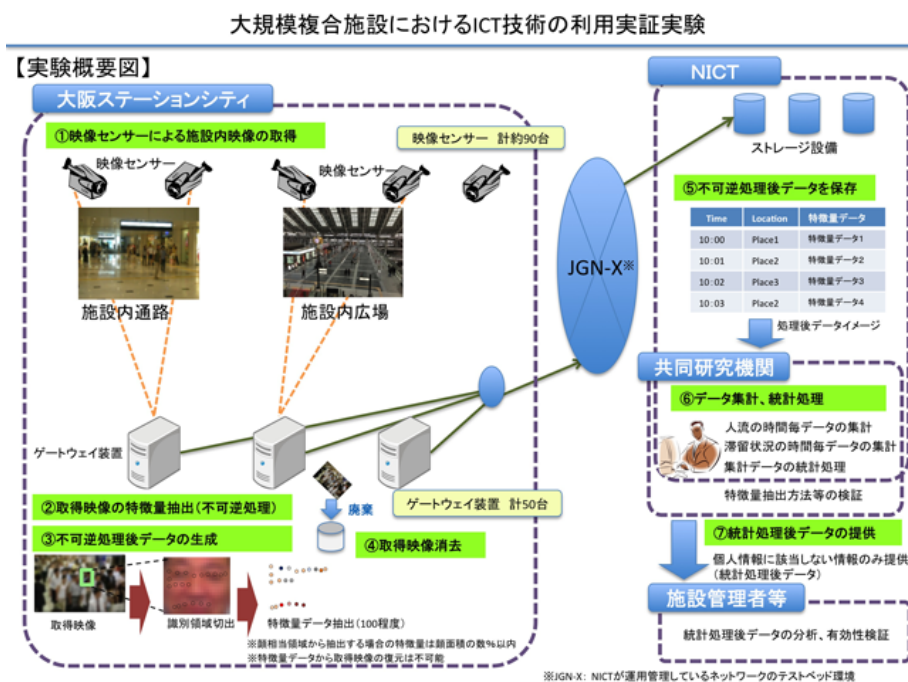


図 23 実証実験概要 (引用: [74])

映像解析	顔特徴量解析	マルチモーダル解析	歩容解析	顔特徴量解析	歩行者検知解析
情報取得方法	顔特徴量を用いてマッチング	服装等複数の外見的特徴を用いてマッチング	歩容(歩きぶり)を用いてマッチング	属性を取得のうえカウンティング	歩行者の形状を検知してカウンティング
1) 特定領域に滞留する人数の把握	○	○	○	○	○
2) 複数経路を移動する人数・所要時間の把握	○	○	○	×	×
3) 属性把握	○	×	×	○	×

図 24 各解析技術の概要と比較 (引用: [75])

10.2.2 問題点

本実証実験では、公共空間にカメラが設置され同意なしに個人追跡されることが問題とされた（本研究も同じ方式をとる）。公共交通機関の利用客は、日々の移動にて実施場所の JR 大阪駅の利用客大阪ステーションシティを通過せざるを得ず、撮影拒否が事実上困難であった。

本件では、「肖像権の侵害」「プライバシー権の侵害」「独立行政法人等個人情報保護法違反」が疑われた。また市民からの反応として、個人を特定されたり、属性情報を取得されたりすることへの懸念や、嫌悪感、また監視社会への恐怖感があったと考えられている。

10.3 各法的側面からの考察

本セクションでは、今後セクション 9.1.2 に記した内容を盛り込んだ上で、本システムを用いた実証実験等に違法性がないかを「肖像権」「プライバシー権」の観点から考察する^{*33}。

10.4 肖像権侵害の疑い

肖像権は、法律上で明文の規定はないものの、判例上日本国憲法 13 条 [77] を根拠に認められている。1962 年に発生した京都府学連事件に際して、最高裁判所大法廷は「個人の私生活上の自由の一つとして、何人も、その承諾なしに、みだりにその容ぼう・姿態（以下「容ぼう等」という。）を撮影されない自由を有する」として肖像権を認めている [78]。一方で別の判例 [79] では、「ある者の容ぼう等をその承諾なく撮影することが不法行為法上違法となるかどうかは、被撮影者の社会的地位、撮影された被撮影者の活動内容、撮影の場所、撮影の目的、撮影の態様、撮影の必要性等を総合考慮して、被撮影者の上記人格的利益の侵害が社会生活上受忍の限度を超えるものといえるかどうかを判断して決すべきである」「人は、自己の容ぼう等を撮影された写真をみだりに公表されない人格的利益も有する」とある。

本研究では、市民の同意を得ずに容ぼう等をカメラで撮影するものであるから、肖像権を侵害しうる可能性がある。しかし、9.1.2 で示した「顔特微量・属性センサ」を用いることで、回避しうると考えられる。このセンサでは、カメラの撮像素子から得た、人の容ぼう等を認識可能な画像は、揮発性メモリに限られた時間記録されるにとどまり、瞬時に特微量・属性情報を算出した後に破棄される^{*34}。

上記判例 [79] における「撮影」は、画像情報をフィルム・SD カード等の不揮発性メモリに保存する行為を指すと考えられる。そして、揮発性メモリ上に短時間保存する行為を「撮影」と呼ぶかは疑わしい [75]。揮発性メモリバッファに短時間映像が記録される機械的プロセスは、デジタルカメラの電子ファインダー等と同様であり、ファインダーを覗いただけで撮影したことにはならないことと照らし合わせると、こちらも「撮影」とは言いえないと考えることは可能であろう。

上記の理由から、本研究は「容ぼう等を撮影」することにはあたらないと考えられる。また、特微量のみ保存するため、写真を公表することは起こり得ない。また肖像権とは、人の画像やイラスト等に表出する人格を保護法益とする権利であることから、特微量のような人格が表出されていないものについては、肖像権の問題ではなくプライバシー権の問題と考えられる [75]。そのため、本研究内容に関して肖像権の侵害はない、もしくはあるとしても公共の利益に係る目的のためであり「みだりな撮影」には該当しないと考えられる。

^{*33} なお、著者はあくまでシステムを開発・提供するにすぎず、本考察内容及び本システムの利用に対していかなる法的責任も負わない。

^{*34} ガベージコレクタの挙動次第で、カメラデバイスの電源が切れない限り画像データがメモリ上に断片的に残り続ける可能性は完全には否定できない。その点を考慮し、特微量算出後は即メモリ領域をクリアすることで、コールドブート攻撃などを極力防ぐような実装が求められるだろう。

10.5 プライバシー権侵害の疑い

プライバシー権は、「私生活をみだりに公開されないという法的保障ないし権利」と定義づけられる。また、侵害が認められるための要件として、公開された内容が「私生活上の事実または私生活上の事実らしく受け取られるおそれのあることがらであること」「一般人の感受性を基準にして当該私人の立場に立った場合公開を欲しないであろうと認められることがらであること、換言すれば一般人の感覚を基準として公開されることによつて心理的な負担、不安を覚えるであろうと認められることがらであること」「一般の人々に未だ知られていないことがらであること」が挙げられる [80]。

こうしたプライバシー権について、「公共の場所におけるプライバシーについて」「画像の撮影の是非」「顔特徴量抽出について」「移動経路情報について」の観点から考察する。

まず、公共の場所にプライバシーはあるのかについて考える。これが問題になった例として、「囚われの聴衆事件」がある。これは、大阪市営地下鉄を利用する原告が、意思に反して商業広告放送を聞かされたとして、地下鉄内での商業広告放送の差止めなどを求めたものである。この裁判の判決にて、公共の場所におけるプライバシーについて、「プライバシーは公共の場所においてはその保護が希薄とならざるをえず、受忍すべき範囲が広がることを免れない。個人の居宅における音による侵害に対しては、プライバシーの保護の程度が高いとしても、人が公共の場所にいる限りは、プライバシーの利益は、全く失われるわけではないがきわめて制約されるものになる」としている。しかし、「問題は、本件商業宣伝放送が公共の場所ではあるが、地下鉄の車内という乗客にとって目的地に到達するため利用せざるをえない交通機関のなかでの放送であり、これを聞くことを事実上強制されるという事実をどう考えるかという点である。これが『とらわれの聞き手』といわれる問題である」とし、「しかし、このような聞き手の状況はプライバシーの利益との調整を考える場合に考慮される一つの要素となるというべきであり、本件の放送が一般の公共の場所においてプライバシーの侵害に当たらないとしても、それが本件のような「とらわれの聞き手」に対しては異なる評価をうけることもありうるのである。」とされている [81]。

この判例に則ると、公共の場所のプライバシーは制限されるが、その場所の利用をやめることが事実上難しい場合については、評価が難しいと考えられる。

また、あいりん地区テレビカメラ設置事件においては、「人は一歩外に出ると全てのプライバシーを放棄したと考えるのは相当でない（から）監視の態様や程度の如何によつてはなおプライバシーの利益を侵害するおそれがある」「公共の場所とはいっても、(中略) 特殊な意味あいを持つ場所の状況をことさら監視したり、相当多数のテレビカメラによって人の生活領域の相当広い範囲を継続的かつ子細に監視するなどのことがあれば、監視対象者の行動形態、趣味・嗜好、精神や肉体の病気、交友関係、思想・信条等を把握できないとも限らず、監視対象者のプライバシーを侵害するおそれがあるばかりか、これと表裏の問題として、かかる監視の対象にされているかもしれないという不安を与えること自体によつてその行動等を萎縮させ、思想の自由・表現の自由その他憲法の保障する諸権利の享受を事実上困難にする懸念の生ずることも否定できない」と述べられている [82]。

実際に本システムにおいても、カメラ設置箇所は公共の場所を想定している。また設置箇所が、例えば駅などの交通結節点であった場合などに、市民がその利用を事実上やめることができないケースは容易に想像できる。こうした場所に設置され、個人を継続的かつ詳細に追跡するものであることから、本研究は公共の場所を対象とするからといってプライバシーの侵害がないとは言えない

次に、画像の撮影の是非について考える。本システムでは、9.1.2 に示した顔特徴量・属性センサを用いれば、画像はカメラデバイスの揮発性メモリ上に短時間残るだけであることから、画像の「撮影」はそもそも起こり得ないと考えられる。そのため、画像を撮影することによるプライバシー権の侵害はないといえるだろう。

また、顔特徴量生成について考える。顔特徴量は、そのデータから元画像の復元には至らなくとも、特徴量に基づいて個人を識別でき、追跡することが可能となる。そのため流出や不正使用があった場合に平穏な生活が阻害され、プライバシーが侵害されうると考えるべきだろう。また、顔特徴量はパスワードなどと異なり、指紋のように変更がきかない情報であることから、保護の重要性は高いといえるだろう。

そこで、セクション 9.1.2 では、秘密計算技術を用いることを提言している。画像と同じく、顔特徴量も一時的に揮発性メモリにバッファされるに留まり、即時暗号化する。これにより、特徴量が解読可能な形で流出することを防ぐ。このような対策を取り、顔特徴量から任意の計算を可能としつつも、その生データを見ることができないシステムを構築することで、プライバシー侵害を発生させないことが可能となる。そのため、顔特徴量生成によるプライバシー権侵害は起こり得ないと考えられる。

移動経路情報について考える。一人ひとりの移動経路情報を算出・公開することは、匿名化を行ったとしても、実際に観察することで個人を特定することが不可能ではなく、プライバシー侵害にあたると考えられる。

現在の本システムでは、サーバー側 API にて、一人ひとりの移動経路情報が返される実装となっている（フロントエンド側にて、そうした情報を基に拠点・拠点間の人数・属性分布などを計算し、可視化している）。そこで、サーバー側でこうした統計処理を施し、API ではそうした処理済みのデータを返すような実装に変更する（計算時には揮発性メモリ領域のみを利用し、不揮発性メモリに一人ひとりの移動経路情報は保存しない）ことで、こうした問題を回避できると考えられる。

一人ひとりの追跡情報ではなく、拠点間の移動人数・属性分布などの情報であれば、特定個人のプライバシーを侵害することはないと考えられる。

10.6 個人情報保護法の遵守

まず日本国内の個人情報保護法^{*35}において、カメラ画像は特定の個人の識別が可能な状態であれば、「個人情報」に該当する。更に画像から特定の個人を識別するために、顔などの特徴を電子計算機の用に供するために変換した符号、すなわち本システムの `service_face_encoding` にて抽出している顔特徴量は「個人識別符号」に該当する。なお、それを秘密計算用に暗号化したデータもこの「個人識別符号」に相当するかは判断がわかれそうではあるが、そして、この符号により特定の個人情報を電子計算機を用いて検索することができるように体系的に構成した個人情報を含む集合物は、「個人情報データベース等」に、当該個人情報は「個人データ」に該当する。そのため本システムとそのデータは、それぞれ「個人情報データベース等」「個人データ」に該当するものと考えられる。また、6 ヶ月を超えて保有する個人情報は「保有個人データ」に該当する。

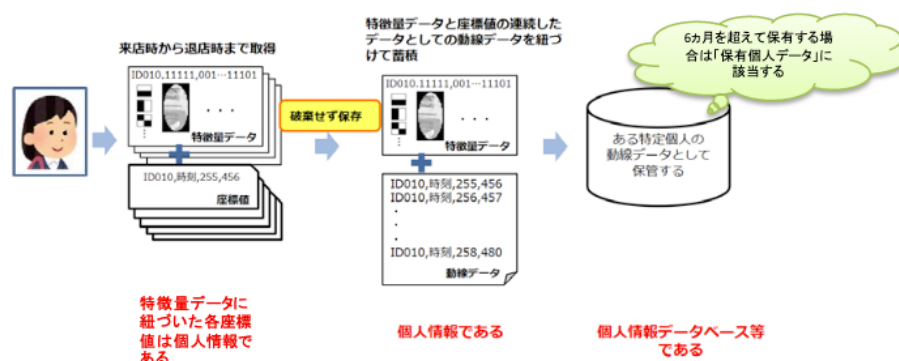


図 25 個人情報の考え方 (引用: [84])

このような個人データ及びそのデータベースの利活用のありかたや留意するポイントを、IoT 推進コンソー

^{*35} 個人情報の保護に関する法律（平成十五年法律第五十七号）[83]

シアン・総務省・経済産業省が「カメラ画像利活用ガイドブック」[84]にまとめている。

本ガイドブックが想定している状況は、画像 26 のとおりである。動線把握や属性推定といった領域について、主に特定空間^{*36}における利活用にフォーカスが絞られている。本システムが想定する、広範囲に及ぶ公共空間における動線把握や属性推定といった利用範囲における、利活用のあり方・留意するポイントは触れられていない。

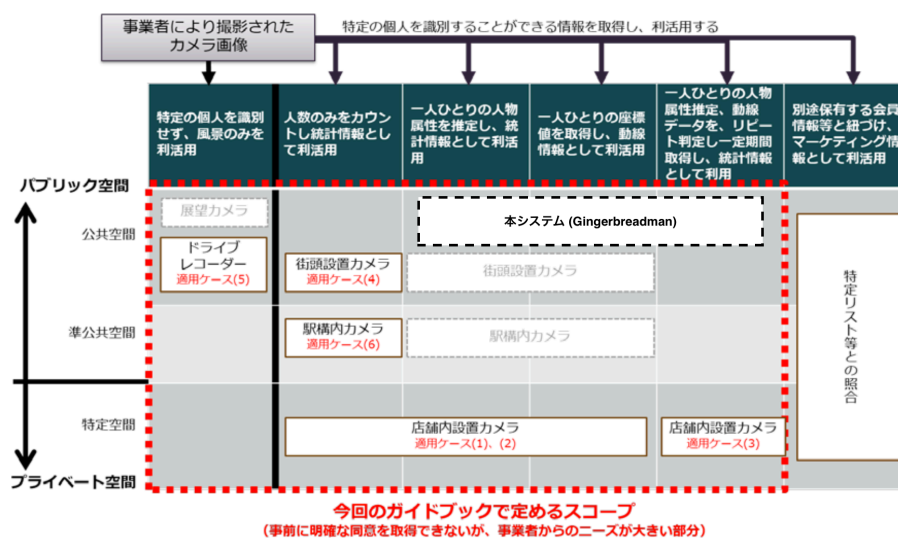


図 26 カメラ画像利活用ガイドブックの想定範囲（引用：[84]、一部改変）

そのため本ガイドブックを大まかに参考にしつつ、公共目的利用のあり方・留意点・想定されるケースと対応例といったものをまとめたガイドラインを策定する必要があると考えられる。

その際には、主に以下のポイントを検討する必要があると言えるだろう。

- 同意なき撮影の是非

特定空間であれば、施設の入り口に撮影中である旨と利用目的などを掲示しておくことで、被補足者全員への告知が可能となる。しかし公共空間においては、その領域への入口（通路など）が無数にあり、被補足者全員に告知を行い同意を得ることが難しい。

また、特定空間であれば「撮影されたくないから立ち入らない（別の施設を利用する）」という選択肢が与えられる。しかし公共空間の場合は、そこで元から生活している者や仕事をしている者に対し、そうした選択肢が事実上与えられないに等しい。

- 第三者に対する情報提供のあり方

本システムの運用主体を仮に行政とした場合、取得した情報及び分析結果を都市計画に活かすだけでなく、商店街等の事業者を提供すれば彼らの事業計画に活用することができ、売上向上などに寄与できると考えられる。しかしプライバシー保護の観点から、そうした第三者に情報を提供することに不快感を示す市民が一定数いることも想定される。また、不正利用などのリスク管理も難しくなることが予想される。

- データ管理

上記 2 点と関連して、データの管理のあり方も考える必要がある。半永久的に顔特徴量を保存しておくことは、長期間に渡った動線把握を可能にするものの、仮に不正利用された際にどこまでもさかのぼっ

^{*36} プライベート空間（入り口やゲートで明確に分けられた区域内）。店舗内や施設内等。[84]

て個人を追跡することが可能になることを意味する。

そこで例えば、1ヶ月間で調査を一旦打ち切りにし、統計的に加工したデータを得た後で顔特徴量を破棄するといったような、期間を区切った調査をすることを検討するべきだろう。

- 合意形成

付録 A.7 に実体験を記したように、本システムのカメラを用いた個人追跡は地域住民に大きな抵抗感を持たれる傾向があると考えられる。

市民に、本システムの活用方法をデメリットも含め丁寧に説明し、ある程度の合意を得る必要がある。それを怠り、無理やり、あるいはそれと分からないように導入した場合、反発に遭うことが容易に想像できる。

そこで、合意形成を図る際に使える手法などを研究し、ガイドラインに盛り込む必要がある。

謝辞

本研究は、その多くを国立長野高専 環境都市工学科 轟研究室にて行わせていただきました。轟准教授、ならびに研究室のメンバーには多くの助言を頂きました。感謝しています。

また、付録 A に記載した試行実験は、長野県飯山市にて行わせていただきました。飯山市 公民連携推進室の担当者の方、ならびに地域住民の方々には、大変感謝しております。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 石井裕介, 日野泰雄, and 内田敬, “中心市街地のにぎわいの定量的評価に関する基礎的研究-御堂筋オープンテラス社会実験を事例として,”
- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. 2019. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.18356/b9e995fe-en>. [Online]. Available: <https://www.un-ilibrary.org/content/publication/b9e995fe-en>.
- [3] Real Estate Research Corporation, “The costs of sprawl: Environmental and economic costs of alternative residential development patterns at the urban fringe,” *Portland Regional Planning History*, 1974.
- [4] 谷口守, 入門 都市計画 -都市の機能とまちづくりの考え方-. 2014.
- [5] 黒川洸, 谷口守, 橋本大和, and 石田東生, “スプロール市街地の整備コストに関する一考察 -先行的都市基盤整備のコスト節減効果に関する検討-,” 都市計画論文集, vol. 30, pp. 121–126, 1995. DOI: 10.11361/journalcpj.30.121.
- [6] 玉置豊, “田舎暮らしでマンションという選択肢はアリ? 山形の田園に突如現れるタワーマンションの住人に聞いてみた,” ライブドアニュース *SUUMO* ジャーナル, 2017. [Online]. Available: <https://news.livedoor.com/article/detail/13320390/>.
- [7] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の地域別将来推計人口（平成 30（2018）年推計）－平成 27（2015～57（2045）年－,” 人口問題研究資料第 340 号, 2018, ISSN: 1347 - 5428. [Online]. Available: <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/6houkoku/houkoku.asp>.
- [8] 饗庭伸, 都市をたたむ: 人口減少時代をデザインする都市計画. 花伝社, 2015, ISBN: 9784763407627.
- [9] 国土交通省 都市局 都市計画課, コンパクト・プラス・ネットワークの推進について, 2019. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001170865.pdf>.
- [10] 国土交通省, 国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計, 2018.
- [11] —, “平成 23 年度 国土交通白書,” in. 2011, ch. 2.
- [12] 越川知紘 and 谷口守, “都市別自動車 co2 排出量の長期的動向の精査-全国都市交通特性調査の 28 年に及ぶ追跡から-,” 土木学会論文集 *G（環境）*, vol. 73, no. 6, II 169–II 178, 2017. DOI: 10.2208/jscej.73.II_169.
- [13] 日本国, “中心市街地の活性化に関する法律（平成十年法律第九十二号）,” 2018, 施行日：平成三十年十月二十二日, 最終更新：平成三十年六月二十二日公布（平成三十年法律第六十二号）改正.
- [14] 内閣官房地域活性化統合事務局 中心市街地活性化推進委員会, “中心市街地活性化に向けた 制度・運用の方向性,” Dec. 2013.
- [15] 国土交通省 都市局 都市計画課 都市計画調査室, まちの活性化を測る歩行者量調査のガイドライン, 2019. [Online]. Available: https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000034.html.
- [16] 柴田久, 地方都市を公共空間から再生する 日常のにぎわいをうむデザインとマネジメント. 2017.
- [17] 大森宣暁, 室町泰徳, and 原田昇, “交通行動調査への gps の適用可能性に関する研究,” 交通工学研究発表会論文報告集, no. 18, pp. 5–8, Nov. 1998. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/40005217281/>.
- [18] 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, and 田名部淳, “Phs による位置情報を用いた交通行動調査手法,” 土木学会論文集, no. 653, pp. 95–104, 2000.
- [19] 安藤亮介 and 氏原岳人, “プローブパーソンデータを用いた中心市街地における歩行者中心の都市空間創出の影響分析:来訪者の交通行動と居住地特性に着目して,” 都市計画論文集, vol. 53, no. 2,

- pp. 161–171, 2018, ISSN: 0916-0647. DOI: 10.11361/journalcpj.53.161. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/130007500737/>.
- [20] 味八木嵩, 山崎俊彦, and 相澤清晴, “1-2 wi-fi 位置推定を利用した複合センサトラッキング (第 1 部門メディア工学 1),” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, vol. 2007, 2007. DOI: 10.11485/iteac.2007.0_1-2-1_.
- [21] 長田哲平, 加納壮貴, 大森宣暁, and 古池弘隆, “中心市街地における受動赤外線型自動計測器を用いた歩行者通行量の分析,” 交通工学論文集, vol. 4, no. 1, B38–B45, 2018. DOI: 10.14954/jste.4.1_B_38.
- [22] 高藤巧, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 下條真司, *et al.*, “トラッキングスキャナとモーションセンサを用いた高精度屋内位置推定手法の提案,” 情報処理学会論文誌, vol. 57, no. 1, pp. 353–365, 2016.
- [23] 関谷浩孝, 上坂克巳, 橋本浩良, and 高宮進, “「画像処理による交通量計測手法」についてのインドネシア公共事業省道路研究所との共同研究,” 土木技術資料 = *Civil engineering journal: 土木技術の総合情報誌*, vol. 55, no. 7, pp. 24–27, 2013.
- [24] 川崎紀一 and 西山和人, “画像処理技術を用いた交通流計測と今後の方向性,” 第 33 回土木計画学研究発表会 講演集, 2006, 2006.
- [25] 林泰士, 松田奈緒子, 山下英夫, 里内俊介, 中田寛臣, and 横地和彦, “Ai を活用した画像認識型交通量観測の導入に関する研究,” 2019.
- [26] 豊田市, 豊田市中心市街地歩行者通行量自動計測装置 結果概要 (抜粋版), 2013. [Online]. Available: https://www.city.toyota.aichi.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/007/658/03_siry00302.pdf.
- [27] 福本大輔, 蛭子哲, 木全淳平, 二木徹, 石田真一, 越智健吾, and 関信郎, “顔認証技術の活用による歩行者交通流動調査の実現可能性に関する一考察,” 2019.
- [28] 日本電気株式会社, カメラ画像活用による人物属性/動線/棚前行動取得事例のご紹介, 2016. [Online]. Available: <http://www.ilotac.jp/wp-content/uploads/2017/12/%E7%AC%AC1%E5%9B%9E%E3%80%90%E8%B3%87%E6%96%994%E3%80%91%E3%82%AB%E3%83%A1%E3%83%A9%E7%94%BB%E5%83%8F%E6%B4%BB%E7%94%A8%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E5%BA%97%E8%88%97%E5%86%85%E5%B1%9E%E6%80%A7%E3%80%81%E8%A1%8C%E5%8B%95%E5%8F%96%E5%BE%97%E6%A6%82%E8%A6%81.pdf>.
- [29] D. L. Doctoroff, “Why we’re no longer pursuing the quayside project — and what’s next for sidewalk labs,” *Medium*, May 2020. [Online]. Available: <https://medium.com/sidewalk-talk/why-were-no-longer-pursuing-the-quayside-project-and-what-s-next-for-sidewalk-labs-9a61de3fee3a>.
- [30] Sidewalk Labs, “The river district,”
- [31] S. Moss, “Toronto smart city proposal from alphabet’s sidewalk labs includes plan to use data center waste heat,” *DCD*, Jun. 2019.
- [32] *Keras: The python deep learning api*. [Online]. Available: <https://keras.io/>.
- [33] *Ageitgey/face-recognition: The world’s simplest facial recognition api for python and the command line*. [Online]. Available: https://github.com/ageitgey/face%5C_recognition.
- [34] *Dlib c++ library*. [Online]. Available: <http://dlib.net>.
- [35] F. Schroff, D. Kalenichenko, and J. Philbin, “Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 815–823.
- [36] G. B. Huang, M. Ramesh, T. Berg, and E. Learned-Miller, “Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments,” University of Massachusetts, Amherst, Tech. Rep. 07-49, Oct. 2007.

- [37] dlib, *Dlib.net/face_recognition.py.html*. [Online]. Available: http://dlib.net/face_recognition.py.html.
- [38] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu, *et al.*, “A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise,” in *Kdd*, vol. 96, 1996, pp. 226–231.
- [39] scikit-learn developers, *Sklearn.cluster.dbSCAN — scikit-learn 0.22.2 documentation*. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>.
- [40] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, *Deep residual learning for image recognition*, 2015. arXiv: 1512.03385 [cs.CV].
- [41] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, and L. Fei-Fei, “ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database,” in *CVPR09*, 2009.
- [42] J. Gerald, *Utkface large scale face dataset*. [Online]. Available: <https://susanqq.github.io/UTKFace/>.
- [43] Django Software Foundation, *The web framework for perfectionists with deadlines — django*. [Online]. Available: <https://www.djangoproject.com/>.
- [44] E. Czaplicki, *Elm - a delightful language for reliable webapps*. [Online]. Available: <https://elm-lang.org>.
- [45] —, “Elm: Concurrent frp for functional guis,” *Senior thesis, Harvard University*, 2012.
- [46] V. Agafonkin, *Leaflet - a javascript library for interactive maps*.
- [47] G. Inc., *Electron — build cross-platform desktop apps with javascript, html, and css*. [Online]. Available: <https://www.electronjs.org/>.
- [48] OpenStreetMap Foundation, *Openstreetmap*. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org>.
- [49] A. Rumpf, *Nim programming language*. [Online]. Available: <https://nim-lang.org/>.
- [50] Eric S. Raymond, 伽藍とバザール *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary*, 山形 浩生 訳, 発言は Linus Benedict Torvalds のもの, ISBN: 9781565927247.
- [51] 国土交通省, 立地適正化計画作成の取組状況. [Online]. Available: https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/toshi_city_plan_fr_000051.html.
- [52] 長野市, “長野市立地適正化計画 概要版,” 2017.
- [53] 総務省, “平成 27 年度 情報通信白書,” in. 2015, ch. 2.
- [54] 柴田久, “安全安心と賑わいを再生した都市公園の空間デザイン—福岡市警固公園—,” 産学官連携ジャーナル 2016 年 6 月号, Jun. 2016. [Online]. Available: https://sangakukan.jst.go.jp/journal/journal_contents/2016/06/articles/1606-02-3/1606-02-3_article.html.
- [55] 景観まちづくり研究室 福岡大学 柴田研究室, 警固公園再整備事業, 2016. [Online]. Available: http://www.tec.fukuoka-u.ac.jp/tc/labo/keikan/works/project/pj%20report/kegopark_pj%20report.pdf.
- [56] 日本経済再生本部, 日本再興戦略 -japan is back-, Jun. 2013. [Online]. Available: <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/kettei.html#saikou2013>.
- [57] S. Yang, P. Luo, C. C. Loy, and X. Tang, “Wider face: A face detection benchmark,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.
- [58] 総務省, 住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数, Jan. 2019. [Online]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/daityo/jinkou_jinkoudoutai-setaisuu.html.

- [59] J. Dugan, S. Elliott, B. A. Mah, J. Poskanzer, K. Prabhu, *et al.*, *Iperf - the ultimate speed test tool for tcp, udp and sctp*. [Online]. Available: <https://iperf.fr/>.
- [60] 佐久間淳, データ解析におけるプライバシー保護, ser. 機械学習プロフェッショナルシリーズ. 講談社, 2016.
- [61] NVIDIA, モダン ai のパワーを数百万のデバイスへ - *nvidia jetson nano*. [Online]. Available: <https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>.
- [62] J. Redmon and A. Farhadi, “Yolov3: An incremental improvement. arxiv 2018,” *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2019.
- [63] J. Deng, J. Guo, and S. Zafeiriou, “Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition,” *CoRR*, vol. abs/1801.07698, 2018. arXiv: 1801.07698. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1801.07698>.
- [64] G. M. Amdahl, “Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities, reprinted from the afips conference proceedings, vol. 30 (atlantic city, n.j., apr. 18–20), afips press, reston, va., 1967, pp. 483–485, when dr. amdahl was at international business machines corporation, sunnyvale, california,” *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 12, no. 3, pp. 19–20, 2007.
- [65] P. S. Foundation, *Global interpreter lock — 用語集 — python 3.8.3 ドキュメント*. [Online]. Available: <https://docs.python.org/ja/3/glossary.html#term-global-interpreter-lock>.
- [66] A. Howard, M. Sandler, G. Chu, L.-C. Chen, B. Chen, M. Tan, W. Wang, Y. Zhu, R. Pang, V. Vasudevan, Q. V. Le, and H. Adam, “Searching for mobilenetv3,” *CoRR*, vol. abs/1905.02244, 2019. arXiv: 1905.02244. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1905.02244>.
- [67] 酒井達弘, 田村慶一, 北上始, and 竹澤寿幸, “最小外接矩形とセルの再帰分割を用いたセルベースの dbscan の高速化,” *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. 101, no. 4, pp. 690–701, 2018.
- [68] 黒須正明, *UX 原著*. 近代科学社, 2020.
- [69] V. Roto, E. Law, A. Vermeeren, and J. Hoonhout, ユーザエクスペリエンス (*ux*) 白書, hcdvalue 訳, Feb. 2011.
- [70] U. I. D. GmbH, *Attrakdiff*. [Online]. Available: <http://attrakdiff.de/index-en.html>.
- [71] 黒須正明, “ユーザ工学と経験工学,” *放送大学研究年報*, vol. 34, 2016. [Online]. Available: https://lib.ouj.ac.jp/nenpou/no34/34_06.pdf.
- [72] B. R. Connell, M. Jones, R. Mace, J. Mueller, A. Mullick, E. Ostroff, J. Sanford, E. Steinfeld, M. Story, and G. Vanderheiden, “The center for universal design,” 1997. [Online]. Available: https://projects.ncsu.edu/ncsu/design/cud/about_ud/udprinciplestext.htm.
- [73] 情報通信アクセス協議会 and ウェブアクセシビリティ基盤委員会, “Jis x 8341-3:2016 解説,” 2016. [Online]. Available: <https://waic.jp/docs/jis2016/understanding/201604/>.
- [74] 独立行政法人情報通信研究機構, “大規模複合施設における ict 技術の利用実証実験を大阪ステーションシティで実施,” Nov. 2013. [Online]. Available: <http://www.nict.go.jp/press/2013/11/25-1.html>.
- [75] 菊池浩明, 石井夏生利, 小林正啓, 鈴木正朝, and 高木浩光, “調査報告書,” Oct. 2014.
- [76] 独立行政法人情報通信研究機構, “大阪ステーションシティでの ict 技術の利用実証実験の延期について,” Mar. 2014.
- [77] 日本国, “日本国憲法,” 1946. [Online]. Available: https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=321CONSTITUTION#43.
- [78] 石田和外, 入江俊郎, 草鹿浅之介, 長部謹吾, 城戸芳彦, 田中二郎, 松田二郎, 岩田誠, 下村三郎, 色川幸太郎, 大隅健一郎, 松本正雄, 飯村義美, 村上朝一, and 関根小郷, “最高裁判所判例 刑集 23 卷 12 号 1625,”

- Dec. 1969. [Online]. Available: https://www.courts.go.jp/app/files/hanrei_jp/765/051765_hanrei.pdf.
- [79] 島田仁郎, 横尾和子, 甲斐中辰夫, 泉徳治, and 才口千晴, “最高裁判所判例 民集第 59 卷 9 号 2428 頁,” Nov. 2005. [Online]. Available: https://www.courts.go.jp/app/files/hanrei_jp/388/052388_hanrei.pdf.
- [80] 石田哲一, 滝田薫, and 山本和敏, “「宴のあと」事件,” Sep. 1964. [Online]. Available: <https://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~suga/hanrei/10-1.html#shubun>.
- [81] 貞家克己, 伊藤正己, 安岡満彦, and 坂上壽夫, “最高裁判所判例集 集民 第 155 号 377 頁,” Dec. 1988.
- [82] 井垣敏生, 田昌利, and 清水俊彦, “大阪地方裁判所 平成 2 年 (ワ) 5 0 3 1 号 判決,” 1990.
- [83] 個人情報の保護に関する法律. 日本国, 2018. [Online]. Available: https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=415AC0000000057.
- [84] IoT 推進コンソーシアム and 総務省 and 経済産業省, カメラ画像利活用ガイドブック ver2.0. Mar. 2018.
- [85] R. P. Foundation, *Raspbian*. [Online]. Available: <https://www.raspbian.org/>.
- [86] billz and contributors, *Raspap-webgui — simple ap setup & wifi management for debian-based devices*. [Online]. Available: <https://raspap.com/>.
- [87] J. Malinen and contributors, *Hostapd: Ieee 802.11 ap, ieee 802.1x/wpa/wpa2/eap/radius authenticator*. [Online]. Available: <https://w1.fi/hostapd/>.
- [88] 得能正太郎, *NEW GAME! 1 巻*. 芳文社, 2014.
- [89] F. Rosenblatt, “The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain.,” *Psychological review*, vol. 65, no. 6, p. 386, 1958.
- [90] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, “Going deeper with convolutions,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1–9.
- [91] S. Ioffe and C. Szegedy, “Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift,” *arXiv preprint arXiv:1502.03167*, 2015.
- [92] 斎. 康毅, ゼロから作る *Deep Learning*. オライリー・ジャパン, 2016.
- [93] A. Veit, M. J. Wilber, and S. Belongie, “Residual networks behave like ensembles of relatively shallow networks,” in *Advances in neural information processing systems*, 2016, pp. 550–558.

付録 A 試行実験

A.1 概要

本研究は、地域における人々の行動の実態を把握し、課題を明確化し、都市計画・都市交通政策へと活用することが最終的な目標である。その手段として、本システムを構築した上で実際に交通の流れを可視化することを目指している。

そこで本システムの開発開始と並行して、実際にカメラを街路空間や各施設内に設置し、顔写真を収集することをはじめた。小型カメラデバイスを作成し、長野県飯山市にて、同市の公民連携推進室の支援のもと設置し、顔写真収集の実証実験を行った。

A.2 長野県飯山市の状況

長野県飯山市は人口減少に歯止めがかからず、消滅可能性都市にも指定されている。そこで冬はスキー、夏はグリーンツーリズムの観光資源を活かし、観光によって町おこしをする方法を模索している。

そのような状況があり、すでに観光客呼び込みの施策を検討する際に用いるデータを収集しようと取り組みを行っていた。特に交流人口に注目しており、目視で新幹線駅の利用者数をカウントし、国籍^{*37}や性別等をひとつひとつ推定して記録していた。

その作業を簡略化したいということで、本研究に興味を持っていただき、カメラ設置に協力をいただいた。

A.3 カメラ設置地点

カメラ設置地点として、高橋まゆみ人形館・飯山駅・道の駅千曲川を選んだ。高橋まゆみ人形館は飯山市の主要観光施設であり、多数の人が訪れることからカメラを設置した。また施設内だけでなく拠点間の人の移動も把握するために、交通結節点として飯山駅と道の駅千曲川にもカメラを設置することとした。

曜日としては、多数の来場者がいると思われる土・日曜日を選んだ。実際に当日は、各施設に多数の人が来場していた。

表 11 試行実験の概要

実施日	2019 年 9 月 28 日 (土)		2019 年 9 月 29 日 (日)	
実施時間	9:00～18:00		8:00～18:00	
実施場所	高橋まゆみ人形館	飯山駅	高橋まゆみ人形館	道の駅千曲川
カメラ設置数	4	3	4	6
撮影設定	2fps・画角 54mm × 41mm・解像度 720p			

^{*37} 外見から正確な国籍はわからないので、「欧米」といったように大まかに分類していた。

A.4 作成したカメラデバイス

試行実験の対象施設において、既設の監視カメラ等を利用することが難しかった。そこで、小型撮影デバイスを新たに入手し、配置する必要があった。また電源等の確保が難しかったことから、充電式のポータブルなものであることも必要条件となった。しかし市場において、十数時間に渡る長時間録画や遠隔操作が可能で、安価な充電式カメラデバイスが希少であった。

そこで、安価な SBC である Raspberry Pi Zero WH とカメラモジュールなどを用いて自作した。自作したカメラデバイスの構成と完成品の様子を、それぞれ表 12 と 図 27 に示す。また、作成したソフトウェアについてはセクション A.4.1 に詳細を記す。

表 12 小型撮影デバイスの構成

部品名称	機能	詳細
Raspberry Pi Zero WH	- カメラモジュールより映像を取得 - pi-remote-cam で処理後に ROM^{*38}に保存 - Wi-Fi AP^{*39}	OS: Raspbian Buster ^{*40*41} Wi-Fi: Wi-Fi の AP は, RaspAP ^{*42} 及び hostapd ^{*43} で有効化
Raspberry Pi 用カメラモジュール	Raspberry Pi Zero WH の CSI ^{*44} に接続可能な撮像デバイス	OmniVision 社製 CMOS センサ OV5647
microSD カード	Raspberry Pi Zero WH の ROM	SanDisk SDSQUNS-032G クラス Class 10 容量 32GB
バッテリー	Raspberry Pi Zero WH の電源	Anker Astro E1 容量 5200mAh
ケース	カメラ保護	容量 700ml ほどの, n 透明なプラスチック容器
pi-remote-cam	カメラソフトウェア	自作ソフトウェア. WEB ブラウザを介して遠隔操作が可能.

^{*38} Read Only Memory. 主記憶装置.

^{*39} Access Point.

^{*40} Raspberry Pi 用のオペレーティングシステム [85]. GNU/Linux カーネルで構築された, Debian ディストリビューションの派生.

^{*41} バージョン: Raspbian Buster (GNU/Linux 4.19.66+ #1253), 32bit

^{*42} Raspberry Pi 用の Wi-Fi AP 設定・管理ソフトウェア [86]. バックエンドとして hostapd を用いる.

^{*43} Wi-Fi アクセスポイント管理ソフトウェア [87].

^{*44} Camera Serial Interface.



図 27 作成した小型撮影デバイス

A.4.1 遠隔撮影ソフトウェア pi-remote-cam

本カメラデバイスには、予算の都合上ディスプレイや操作スイッチが存在しないため、遠隔操作によって各種操作・撮像確認を行う必要がある。そこで、遠隔操作ソフトウェア **pi-remote-cam** を実装した。

本ソフトウェアは、Raspberry Pi Zero WH 上で WEB サーバーとして動作する。

Raspberry Pi 用公式ディストリビューションである Raspbian において、システム・サービスマネージャーには systemd が採用されている。pi-remote-cam では systemd 用のユニットファイルを提供しており、これをインストールすることで本カメラデバイス起動時に自動的に本ソフトウェアを起動させている。

また、あらかじめ raspAP を用いて Raspberry Pi Zero WH から Wi-Fi の AP を立てておく。

本ソフトウェア起動後は、ECMAScript6 以降や Websocket 等をサポートする最新の WEB ブラウザ (モバイル端末含む) からアクセスし、各種操作・ライブプレビューの確認を行うことが出来る。一枚撮影・インターバル撮影・動画撮影・ライブプレビュー・撮影済み画像のダウンロード・時刻合わせといった機能を実装済みである。

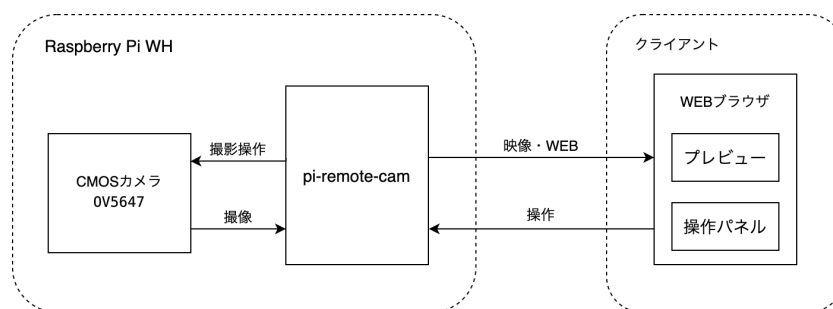


図 28 pi-remote-cam の動作説明図

A.5 カメラデバイス配置

作成したカメラデバイスを、おおよそ人の顔の高さに養生テープで設置した。なお、また、カメラ周辺に図 32 に示す告知ポスターを掲示した。



図 29 高橋まゆみ人形館における小型撮影デバイス設置位置



図 30 飯山駅における小型撮影デバイス設置位置

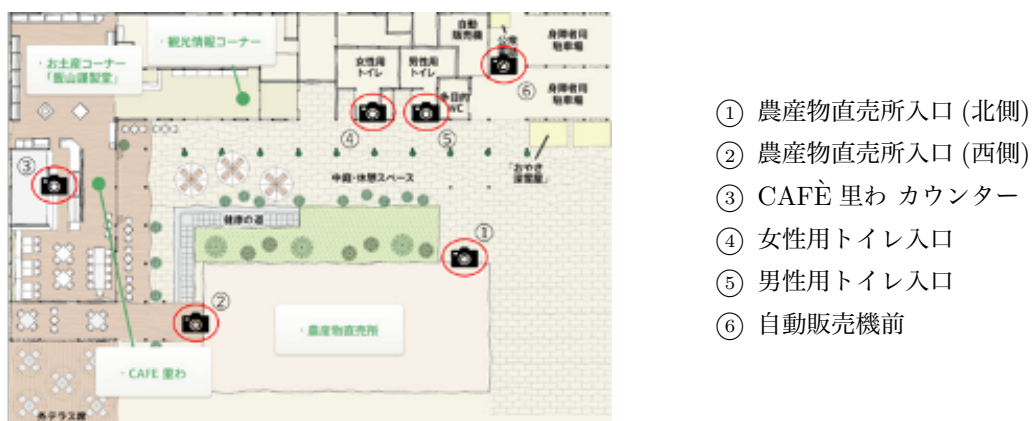


図 31 道の駅における小型撮影デバイス設置位置

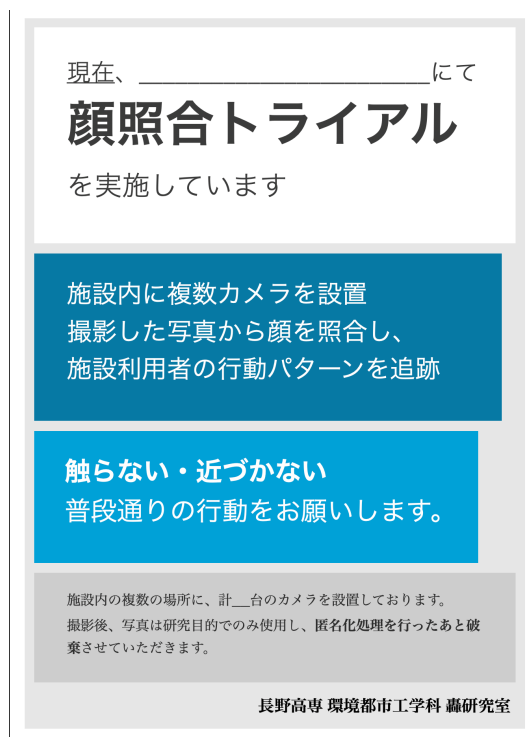


図 32 告知ポスター

A.6 顔検出精度の検証結果

本システムの顔検出機能を実装した段階で、飯山市において自作カメラデバイスで収集した画像を用いて、顔検出の精度を確認した。

表 13 歩行者カウント精度

施設	設置場所	距離	明るさ	目視 (人)	システム (人)	精度 (%)
飯山駅	改札口付近	$\geq 5\text{m}$	やや暗い	256	95	37.1
	観光案内所入口	$\leq 5\text{m}$	明るい	289	255	88.2
	パノラマテラスカウンター	$\leq 5\text{m}$	やや明るい	93	74	79.6
人形館	本館入口	$\leq 3\text{m}$	暗い	519	332	64.0
	ごはん処入口	$\leq 5\text{m}$	やや明るい	340	183	53.8
	お土産コーナー入口	$\leq 5\text{m}$	明るい	452	285	63.1
	ギャラリー	$\leq 5\text{m}$	非常に暗い	-	-	-

道の駅については未検証。

表 13 から、各設置場所の諸条件により、歩行者カウント精度に大きなばらつきが生じていることが分かる。また、飯山駅観光案内所入口等の明るい地点でのカウント精度が高いことから、認識率は撮影画像の明るさに大きく影響されることがわかる。更に、人形館本館入口は暗いにも関わらず、飯山駅改札口付近などと比べて高い認識率を示していることから、歩行者との距離とも相関があることが分かる。

これらの結果から、カメラ設置場所の条件として以下のことが言える。

- 光量の確保

光量を十分確保できる環境にカメラを設置することで、十分な明るさ・低ノイズの画像を得ることは、顔検出率向上に効果的であると考えられる。

- 歩行者との距離を近く

歩行者の顔を大きく補足できるよう工夫することは、顔検出率向上に効果的であると考えられる。

ただし表 13 の明るさの項目については、主観に基づいた大まかなラベル付けを行ったにとどまっている。今後は照度計などを用い、必要な光量の条件等を定量的に把握していく必要がある。

また、屋内設置箇所を中心に、適切な明るさの画像を撮影することができず、十分な検出率を得ることができなかった。特に人形館ギャラリーにおいては、薄暗い環境であったため、目視でもほとんど人の顔を判別できないほどであった。

こうした画質の問題は、カメラの性能に由来する。本カメラデバイスでは、顔をブレさせないためにシャッタースピードを一定値以上に固定させて撮影しており、カメラの可変パラメーターが ISO 感度と絞りのみとなっている。高性能な CMOS センサを用いていないため、ISO 感度や絞りの調節には限界があり、本デバイスではこれ以上の品質の画像を得ることは難しいと考えられる。今後は得られる光量に応じて、既存カメラ以外にも赤外線カメラや高性能な CMOS センサを使用することで、精度改善を図りたい。

A.7 考察

本研究の将来性

お世話になった飯山市担当者の方からは、セクション A.2 に記したような逼迫した現状もあり大きな期待を頂いた。本システムはまだ実用化できる段階にないが、すぐにでも実際に使いたいという声を聞くことができ、ニーズの存在を確認できた。

住民理解を得ることの難しさ

主観的な感想ではあるが、カメラ設置時などに周囲の人々に不審な目でみられることが頻繁にあった。また、今回の試行実験では事前告知が不十分だったこともあり、現地で来訪者から内容について尋ねられたりすることが数回あった。

さらに、道の駅千曲川にて、1 人の年配男性にやや高圧的な態度で詰め寄られることが一度あった。彼に本試行実験の目的や取得した画像の利用手法などを丁寧に説明しても、顔画像を被写体の同意なしに収集されることや、個人が追跡されることに対する不安感を拭うことは難しかった。私も彼の主張には同意できるところが少なくなかったこともあり、匿名化や秘密計算といった技術を実装することの重要性を身をもって知る機会となった。

付録 B ディープラーニングについて

本セクションでは、ディープラーニングについて、いくつかのキーワードに絞って簡潔に解説する。

B.1 機械学習とはなにか

ディープラーニングは、機械学習の一手法である。まず機械学習とはなにか、既存のプログラミングと何が違うのか説明する。

一般的なコンピュータの動作イメージは、プログラムとデータを与えると、プログラムにそって計算を行い、結果を返してくれるというものであろう (図 33a)。ここでのコンピュータは、人間が考えたルール (プログラム) さえ与えれば、そのとおりにデータを処理し、ある程度正確^{*45}な結果を返してくれるものとして認識されている。

しかし、プログラマが手作業でデータの処理ルールを組み立てなくとも、コンピュータがそのルールを学習することも可能なのではないか。こうした疑問から、「機械学習」というパラダイムが生まれた (図 33b)。



図 33 機械学習は新しいプログラミングパラダイム

B.1.1 従来のプログラミング

例として、チャットボットの作成を考える。とりあえずまずは、「おはよう、まだ眠いなあ…」 「おはよ! ふあ〜、よく寝た!」などといった入力に対し『今日も一日頑張ってください』と返し、「今日はハードな一日だった、おやすみ〜」 「もう眠い…おやすみなさい」といった入力に対し『一日お疲れさまでした、おやすみなさい』と返す機能を実装することにする。

従来のプログラミングの作法に則れば、入力文中に「おはよ」の3文字が入っていれば『今日も一日頑張ってください』を、「おやすみ」の4文字が入っていれば『一日お疲れさまでした、おやすみなさい』と返すルールを作成すれば良い (表 14)。実際にこの方式でチャットボットが作成されており^{*46*47}、これらは Symbolic AI と呼ばれる。昔はこの方式が、AI 研究の主流であった。

表 14 ルール 1 「おはよ」が含まれていれば (a) を、「おやすみ」が含まれていれば (b) を返す

入力		出力
おはよ おはよ!	う、まだ眠いなあ…	今日も一日頑張ってください (a)
	ふあ〜、よく寝た!	
今日はハードな一日だった、	おやすみ〜	一日お疲れさまでした、おやすみなさい (b)
もう眠い…	おやすみなさい	

^{*45} 例えば浮動小数点演算の丸め誤差など、必ず正確な結果を返すとは限らない

^{*46} 実際は更に高度なテクニックが用いられている

^{*47} 1960 年代に Joseph Weizenbaum によって作成された ELIZA が有名。この種のプログラムは俗に人工無脳などと呼ばれ、様々な種類のものが作成されてきた。

では、「起床! 今日一日がんばるぞい!」*48という入力には、どう答えればよいのだろうか。どうやら、文章中に「起床」という単語が入っていた際にも『今日一日頑張ってください』と返すルールを追加する必要がある。しかし、入力文中では既に「今日一日がんばる」ことを宣言しているから、『はい、応援しています』などと返したほうが適切に感じられるかもしれない。この場合、「頑張る」「がんばる」などの文字が文章中に存在する場合、別の文章を返すルールも追加したくなる。また、「おはよ…今日は同僚の竹村さんがおやすみで仕事増えそうだなあ、会社行きたくない」という入力文の場合は、「おはよ」と「おやすみ」が混在している。この場合は、文の構造や時間を把握した上でどう返すか選択するような、新しいルールを追加する必要があるようだ。

この方式は結局、いくつものルールを人力で追加していく作業が必要となり、流暢なチャットボットの実現には大変な労力を必要とする。またルールの決め方も、よくわからない。「執筆おわらん、進捗どこですか」「論文も AI で自動生成されないかなあ…」といった入力に対して、『いいからとにかく書きなさい』と返すためには、文章中の単語をチェックするだけでは無理が生じ、なにか別のルールの作り方を考えなければいけない。自然言語処理のような、複雑でファジーな問題を解くためのルールを導き出すことは、Symbolic AI などでは大変難しかった。

B.1.2 機械学習の登場

そこで、機械学習のアプローチの出番である。例えば、メッセージングアプリの自分の入力をデータ、友人の返答を結果として機械学習モデルに投入し、学習をさせることで、ルールを学習させる。そして学習したルールを新しい入力に適用すれば、どんな入力に対しても、適切な返答をするチャットボットが完成する*49。

B.2 ディープラーニング

では、どうすればデータからルールを学ぶことができるようになるのだろうか。早速、機械学習手法の一つであるディープラーニングの方式を説明していく。

B.2.1 パーセプトロン

パーセプトロン [89] は、ディープラーニングの起源となるアルゴリズムである。まずは、このパーセプトロンについて見ていくことにする。

図 34 に、基本的な 2 入力のパーセプトロンを示した。パーセプトロンは、複数の信号を入力とし、一つの出力を持つ。ここで x_1, x_2 は入力信号、 w_1, w_2 は重み、 y は出力を表す。

ここでの y の出力は、次の式 3 のようになる。入力信号はそれぞれ固有の重みが乗算され、その総和がある閾値 θ を超えたときにのみ、1 が出力される。

この重み w *50 と閾値 θ をコントロールすることで、様々な線形関数 (図 35 に示したように、入力に対して出力が直線的に決まることを線形という。そうでないものを非線形という。) を表現できる。

$$y = \begin{cases} 0 & (w_1x_1 + w_2x_2 \leq \theta) \\ 1 & (w_1x_1 + w_2x_2 > \theta) \end{cases} \quad (3)$$

例えば、論理回路*51のうち、AND・OR・NAND といった線形のゲートはこのパーセプトロンひとつで表すことができる。表??に示した真理値表の通りの出力になるように重み・閾値を調節してみると、例えば式 4

*48 マンガ NEW GAME! [88] 中に出てくるセリフ。インターネットミームとして、SNS 上などで広く親しまれている。

*49 現実問題として、機械学習などを用いても、流暢な言葉づかいで完璧な返答をするチャットボットの実現に至ることは難しい。

*50 重みが大きいほど、その入力信号の重要性が高くなることを意味する。

*51 論理回路について知らない方は、坂村 健『痛快! コンピュータ学』(2002, 集英社文庫) 4 章にて易しく解説されているので、参考にしていただきたい。

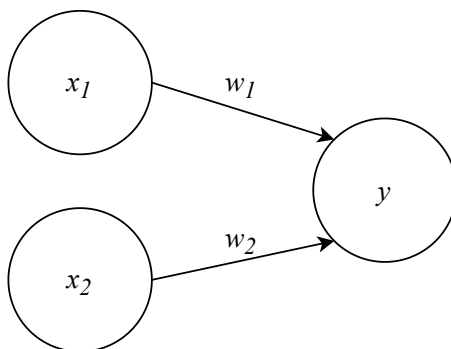


図 34 2 入力のパセプトロン

のような値を設定すれば、各論理ゲートを表現することができる。

$$\begin{aligned}
 \text{AND} &: (w_1, w_2, \theta) = (0.5, 0.5, 0.7) \\
 \text{OR} &: (w_1, w_2, \theta) = (0.1, 0.1, 0.0) \\
 \text{NAND} &: (w_1, w_2, \theta) = (-0.5, -0.5, -0.7)
 \end{aligned} \tag{4}$$

表 15 真理値表

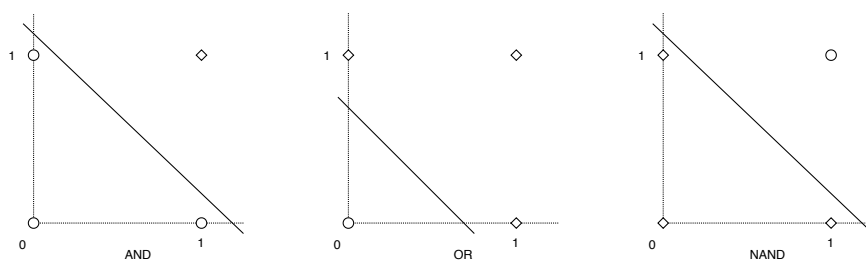
AND		
x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

OR		
x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

NAND		
x_1	x_2	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XOR		
x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

線形



非線形

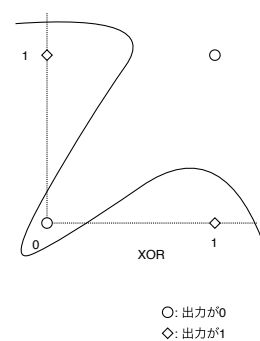


図 35 AND・OR・NAND は線形、XOR は非線形

ここまで、線形関数の表し方を見てきた。では、非線形関数はどう表せばいいのか。一つのパーセプトロンではそれはできないが、パーセプトロンを複数重ねることによって実現できる。例えば XOR であれば、図 36 のように AND、OR、NAND の組み合わせで表せることから、図 37 のように 2 層のパーセプトロンネットワークを用意し、式 7 のように表すことができる。

$$x_{21} = \begin{cases} 0 & (w_{11}x_{11} + w_{12}x_{12} \leq \theta_1) \\ 1 & (w_{11}x_{11} + w_{12}x_{12} > \theta_1) \end{cases}, (w_{11}, w_{12}, \theta_1) = (-0.5, -0.5, -0.7) \quad (5)$$

$$x_{22} = \begin{cases} 0 & (w_{21}x_{11} + w_{22}x_{12} \leq \theta_2) \\ 1 & (w_{21}x_{11} + w_{22}x_{12} > \theta_2) \end{cases}, (w_{21}, w_{22}, \theta_2) = (0.1, 0.1, 0.0) \quad (6)$$

$$y = \begin{cases} 0 & (w_{31}x_{21} + w_{32}x_{22} \leq \theta_3) \\ 1 & (w_{31}x_{21} + w_{32}x_{22} > \theta_3) \end{cases}, (w_{31}, w_{32}, \theta_3) = (0.5, 0.5, 0.7) \quad (7)$$

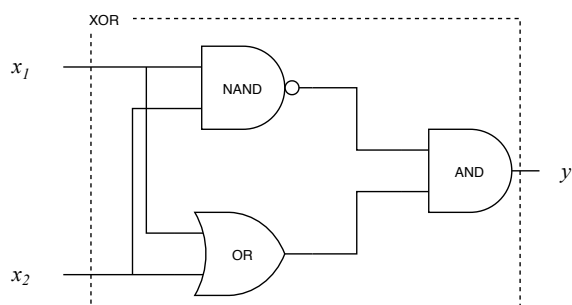


図 36 XOR の回路図

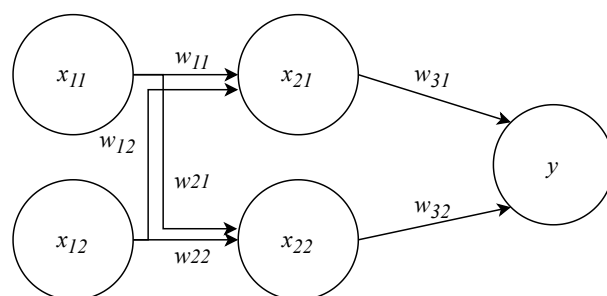


図 37 2 層のパーセプトロン

B.2.2 ニューラルネットワーク

パーセプトロンを複数繋げてネットワークを形成し、重み w や閾値 θ を調節することで、線形関数だけでなく非線形関数も表現できることがわかった。実際に、2 層のパーセプトロンネットワークで任意の関数が表現できることが知られている (後述する活性化関数にシグモイド関数を用いた場合)。重みや閾値を適切な値に設定することができれば、チャットボット関数なども実現できそうだ。

では、各パーセプトロンの重み w はどのようにして決定すればいいのだろうか。論理回路レベルならまだしも、これを人力で決定することは大変な困難を伴う。

そこで、ニューロンの登場である。ニューロンは、パーセプトロンを少し改良したものだ。ニューラルネットワークでは、重みなどのパラメータを自動で学習させるメカニズムが備わっている。

図 38 に、ニューロンの模式図を示した。そして、出力 y は次の式 9 のようになる。

$$h(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq \theta) \\ 1 & (x > \theta) \end{cases} \quad (8)$$

$$y = h(b + w_1x_1 + w_2x_2 \leq \theta) \quad (9)$$

まず気になるのが、 b の存在である。これはバイアスと呼ばれ、その層の

B.2.3 ディープニューラルネットワーク

層を深くするモチベ

[コラム] なぜ今、ディープラーニングが急速に発展しているのか

ニューラルネットワークなどのアイデアは古くから存在した。WEB によるビッグデータの蓄積、GPU の普及、GPGPU フレームワーク (CUDA) の登場もあって、このタイミングで層を深くして実用化ができるようになって流行った

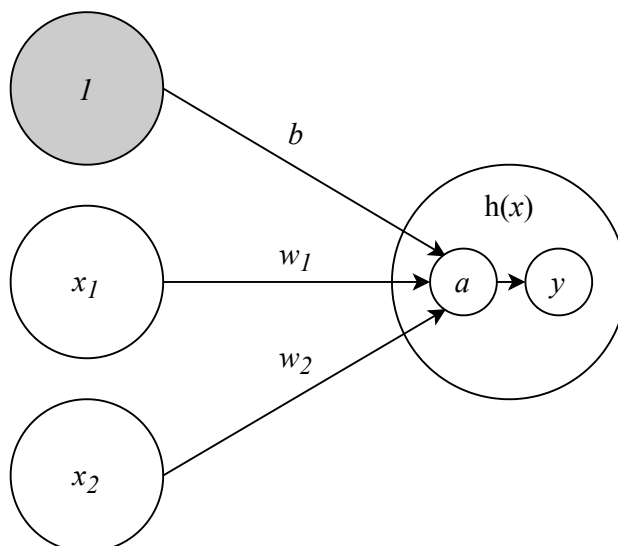


図 38 ニューロンの模式図

B.3 発展ディープラーニング

いろんな手法があるよ

B.4 CNN

B.5 ResNet とは

Resnet は, Microsoft Research のチームにより開発されたネットワークである. 層を深くしても, 勾配消失・爆発などの劣化を起こさず, 高度な表現が獲得できることが特徴である.

以前から, ニューラルネットワークの層を深くすればするほど, 高度な特徴を学習できることは知られていた [90]. しかし層を深くしていくにつれ, 勾配消失・爆発といった現象が起こる. ResNet 以前は Batch Normalization[91] などのテクニックでこうした現象を防いでいたが, 学習が上手く行かず, 最終的な性能は低下してしまうことが多々あった.

そこで, ResNet では「ショートカット」と呼ばれるテクニックを導入した. 図 39 中の 2 つ連続する畳み込み層において, 入力 x を 2 層先の出力にスキップして接続している. 本来 2 層の畳み込み層の出力が $F(x)$ であるところを, スキップ構造によって $F(x) + x$ としていることが特徴である. 少ない層である程度の精度が出ている場合において, 後ろに更に層を追加していく場合, 追加した層は多少調整する程度の役割を担えばよいと考えられることから, identity mapping のパスと畳み込み層に繋げる 2 つのパスを用意して, 最終的にマージすることとしている [40].

スキップ構造は入力データをそのまま流すだけなので, 逆伝播時も, 上流からの勾配をそのまま下流に流すこととなる. そのためスキップ構造によって勾配が減少・増加することなく, 勾配消失問題を軽減することに成功している [92].

また, ブロックを複数つなげた場合に図 40 のようにパスを展開することができる. 実験の結果, 各パスに依存性は少なく, アンサンブル学習のような振る舞いをしていることが確認されている [93].

これにより, 深い層でも性能劣化なしに, 高度な表現を獲得することに成功している.

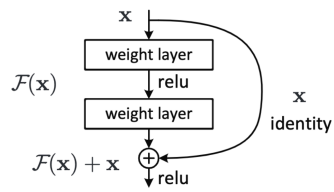
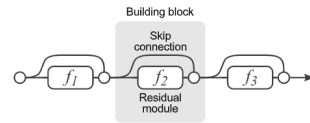
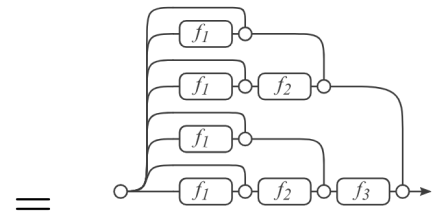


図 39 ショートカット構造を用いた Residual ブロック ([40] より引用)

weight layer は畳み込み層を指す.



(a) Conventional 3-block residual network



(b) Unraveled view of (a)

図 40 Residual Network の展開 ([93] より引用)

B.6 ディープラーニングの民主化

いろいろ複雑だけど、全部ライブラリで一発ですこのシステムも Keras というライブラリを使って、その恩恵にあずかってます