音圧レベルと位置情報を用いた 近接性測定手法の提案と精度検証

ACCURACY VERIFICATION OF THE MEASURING SYSTEM OF PERSONAL NETWORK USING SOUND PRESSURE LEVEL AND LOCATION INFORMATION

内藤 拓也 — * 1 石塚 崇 — * 1
松尾 隆士 — * 1 山本 裕治 — * 1

Kakuya NAITO — * 1 Takashi ISHIZUKA — * 1
Takashi MATSUO — * 1 Yuji YAMAMOTO — * 1

キーワード：
オフィス, フリーアドレス, コミュニケーション, 音圧レベル,
位置情報

Keywords:
Office, Non-territorial office, Communication, Sound pressure level,
Location information

We developed the measuring system of personal network weighted by conversation time using sound pressure level and location information. This paper presents the result of accuracy verification in the real office. In the meeting space, conversations were often made and using location information was sufficient to estimate conversation time. On the other hand, in the non-territorial office space, conversations were not always made and using voice detection by sound pressure level was critical for accuracy.

1. はじめに

近年、企業の知的生産性向上を目的として、ワーカー同士のコミュニケーションの量や質が注目されている。コミュニケーションに関して、Simon (1997)¹⁾はワーカー同士の物理的距離がコミュニケーション頻度を決定づける要因であることを指摘しており、実際にAllen (1977)²⁾によるアメリカのハイテク企業を対象とした調査や、阿部 (2008)³⁾による国内電機メーカーを対象とした調査から、ワーカー間の距離が離れることによって対面コミュニケーションが阻害されることが明らかになっている。建築計画においては、会話を増やしたいワーカーや部署同士を同一フロアとしたり、フロア内で隣接させたりするなど、コミュニケーションは建築のプログラミング（要求条件整理）において考慮すべき重要な要素の一つである。ゆえに、現状の組織内のコミュニケーションを定量的に測定および可視化する手法が求められている。そこで、筆者らは「コミュニケーションを取る頻度などの人と人の関係の深さ」を近接性と呼ぶこととし、ワーカー間の会話の回数や累積時間を測定して定量的に把握することを試みた。

過去にはオフィス内のコミュニケーションを把握するための様々な手段が検討されてきたが、コスト、精度、ユーザー負担などの全てを満足する手段は現在確立されていない。横山ら (2007)⁴⁾のように位置情報のみで近くに居る者同士が会話したと見なす手法の場合、フリーアドレスや Activity Based Working のように働く場所が多様化したオフィスでは、お互いが近くにいるという情報だけで会話の有無を判断することは困難である。西原ら (2014)⁵⁾は画像マーカーをワーカーの頭に取り付け、画像認識を用いてワーカーの位置と頭の向きを把握することでコミュニケーションの有無を判別する手法

を試みているが、建設現場のようにヘルメットの装着が必須となるような環境を除いて、オフィスなどでワーカーの頭に何かを取り付けることは難しい。沼中ら (2016)⁶⁾はウェアラブル端末を用いてワーカーの位置情報と発話の有無を記録し、オフィス内でのワーカー間のコミュニケーション量を推定している。しかし、ウェアラブル端末は個人に紐づく詳細なデータを取得できる一方で、計測の仕方によっては身に着ける位置の制約や定期的な充電を要するなど、対象者に負担が生じる。

そこで、筆者らはユーザーへの負担を少なくするという開発方針のもと、建物側に構築したセンサ群によって音圧レベルとワーカーの位置情報を計測し、これらを組み合わせることで、オフィス内のワーカー間の会話の有無を検知し、近接性を可視化する手法を開発した。また、会話検知を位置情報のみで行った場合と音圧データと組み合わせた場合の精度を実オフィスを対象とした実証実験で比較検証した。本稿は2章で開発した手法の特徴について、3章で実証実験の結果について報告し、4章をまとめとする。

2. 近接性測定手法について

2.1 ワーカーの位置情報の取得

機器構成や測位アルゴリズムなどの組み合わせで屋内測位の方式は様々であるが、ワーカー各々の位置が判別可能で、センサの設置や管理に掛かるコストやワーカーへの負担が少ない方式はある程度限られる。筆者らは環境側に複数のセンサを設置し、ワーカー側は個人識別のためのIDを一定周期で無線通信する携帯型デバイスを使用するシステム構成を採用した。この方式では、ワーカーは社員証などと共にデバイスを携帯すれば良いため負担が少ない。具体的

¹⁾ 清水建設技術研究所
(〒135-0044 東京都江東区越中島 3-4-17)

¹⁾ Institute of Technology, Shimizu Corporation

な構成例を表1に記す。方式によっては位置が座標で得られるものもあるが、本手法では空間を論理的に区画したゾーン（位置識別領域）を定義し、どのゾーンに居たかを位置情報としている。実装する環境に応じて、これらのいずれかの方式を採用し、数秒毎といった時間解像度でリアルタイムに「時刻」、「人物」、「場所」のデータ組を取得し、例えば1分といった時間単位で場所データの最頻値を求め、その時間帯の代表値とする。

表 1 測位システムの構成例

方式	環境側	ワーカー側	精度	コスト
BLE(RSSI)	受信機	BLE ピーコン	低	低
BLE(三角測量)	受信機	BLE ピーコン	低	中
BLE(AoA)	受信機	BLE ピーコン	高	高
Wi-Fi	アクセスポイント	Wi-Fi タグ	低	低
RFID	RFID リーダ	RFID タグ	中	中
UWB(RSSI)	受信機	UWB タグ	低	中
UWB(AoA)	受信機	UWB タグ	高	高

RSSI: Received Signal Strength Indicator, AoA: Angle of Arrival

2.2 人の会話検知

人の会話を検知するためのセンサをワーカー自身が身に着ける場合、マイクを襟元に着ける、もしくは加速度センサを胸元に着けるなど身に着ける位置に制約が生じる。また、常時計測状態であるため相当の電力を消費するが、ウェアラブルとするためには搭載可能なバッテリー容量にも限度がある。そのため、計測期間中のデバイスの充電が必要となり、その都度デバイスの脱着と充電を行うことはワーカーにかなりの負担を強いることになる。そこで、筆者らは会話検知のためのセンサを環境側に設置した。センサは無指向性騒音計を使用し、位置情報の検出単位に対応できるように配置する。取得したデータは位置情報の時間単位と揃えるため、1分や5分といった一定時間単位で会話音声の主成分である500Hz帯域が他の帯域に対してどの程度卓越しているかを分析し、測定環境ごとに定めた閾値以上の場合、その時間帯において会話があったと判断する。以上の手順に従って、「時刻」、「場所」、「会話の有無」のデータ組（以下、会話フラグ）を取得する。

2.3 近接性の可視化

取得した位置情報および会話フラグからワーカー同士の会話の有無を1分毎といった一定時間毎に推定して、期間中に会話が出された回数（以下、会話量）の多寡によって相対的にワーカー同士の関わりの深さ、すなわち近接性を可視化する。近接性は頂点をワーカー、辺を会話の有無、辺の太さを会話量の多寡として重み付きネットワークグラフで表現する。ネットワークグラフ作成にあたって、参照データは隣接行列表現もしくは辺リスト表現を用いるのが一般的である。今回の提案手法において近接性は二者間の会話の有無を対象とし、誰から誰へという方向性を考慮しない。したがって、隣接行列表現よりも辺リスト表現の方がより簡潔に表せる^{注1}ため、以降の説明では辺リスト表現を用いる。具体的に図1に示すような辺リストのデータフォーマットからネットワークグラフ作成が可能である。また、ネットワークグラフの表現方法としては、重みをパネに見立てて力学モデルを適用したレイアウト表現や各頂点を整然と並べたレイアウト表現などが存在する（図2）。前者は関係性の深い

ワーカー同士が近くに配置されるため、視覚的に全体の傾向を把握しやすく、後者は頂点の配置が変わらないため、集計期間などが異なるグラフ同士を比較しやすい。

辺リスト作成は以下の手順に従って行うものとする。

- 対象とするワーカーの全ての組合せリストを作成し、分析の単位時間毎に出力した会話フラグと位置情報データについて、
①～③の処理を繰り返す。
① 会話フラグから会話ありと判断された場所を抽出する
② 同じ場所にいるワーカー同士に会話があったと判断する
③ 会話があったワーカーの組合せに会話量として1加算する
※会話フラグを用いない場合②、③の処理を繰り返す。

①～③の処理によって、各ワーカーの組合せに会話量が加算される条件を図3に示す。図のEとFの位置関係のように、ワーカーのゾーンが異なる場合は、それぞれ別の場所にいると判断するため、会話量が加算されない^{注2}。

図 1 辺リストを用いたネットワークグラフの作成

図 2 ネットワークグラフのレイアウト例

図 3 ある時刻におけるワーカーの位置情報と場所の会話フラグの有無および会話量の加算条件

3. 精度検証実験

3.1 計測方法

清水建設技術研究所のある一部署の執務スペースを対象エリアとし、所属するワーカー25名の内、実験参加に同意が得られた24名について計測した。対象エリアは約16m×20mで、個人作業用のスペースと打合せ用のスペースがある。また、フリーアドレスを採用しており自由に席を選択できる。対象エリアにワーカーの位置情報を取得するためのセミアクティブ型RFIDを用いた測位システム⁷⁾を構築し、3.6m程度の分解能で場所を識別する。音圧レベルを測定する無指向性騒音計も設置した(図4)。計測期間中、ワーカーはRFIDタグを常に携帯し、行動は特に規定せず、通常の勤務を行うものとした。会話フラグについては、ゾーンに隣接する1~3個の騒音計全てで会話が発知された場合に、当該ゾーンでの会話があったと判断した。また、検証のために対象エリア内をタイムラプス撮影し、会話するワーカー同士を記録し、正解データを作成した。検証にはワーカーの在席率やスペースの利用率に偏りがなかった2018年10月4日の9時から17時までのデータを使用する。

図4 オフィスの調査対象エリアのレイアウトと測定点

3.2 検証方法

測定データをもとに、ワーカー同士の会話の有無を1分毎に推定して、測定期間中のワーカー間の会話量を求め、近接性ネットワークグラフを作成する。この時、会話フラグのある場所にいる複数のワーカー同士が会話したと推定する方法(以下、会話フラグあり)と、位置情報のみで同じ位置にいる複数のワーカー同士が会話したと推定する方法(以下、会話フラグなし)のそれぞれを正解データと比較することで、会話フラグの有無が会話検知の精度に与える影響を検証する。正解データと測定データが会話有で一致した場合を正検出、正解データが会話無、測定データが会話有の場合を誤検出、正解データが会話有、測定データが会話無の場合を未検出とする。なお、正解データと測定データが会話無で一致する場合は数多く存在するため正検出からは除く。また、正検出数を測定データの総検出数で除したものを検出精度、正検出数を正解データから得た実会話数で除したものを検出率とする。すなわち、検出精度が高いほど、測定で検出される会話数がより正しいものであることを意味し、検出率が高いほど、実際の会話がより正しく検出されていることを意味する。また、打合せスペースと個人作業スペースでは、空間の使われ方が異なるため、それぞれ区別して検証する。

3.3 実験結果

表2に会話フラグありと会話フラグなしの場合について、検出精度と検出率をまとめた。検出精度について、打合せスペースでは会話フラグありの場合が64.9%なのに対して、会話フラグなしの場合が62.0%とほとんど差がない。これは、場所の特性上、同じ場所に居合わせるが高確率で会話が発生しているためだと思われる。すなわち、打合せスペースのような場所では会話フラグの効果は小さいと言える。一方、個人作業スペースにおいては、会話フラグなしの場合が4.7%と低いのにに対して、会話フラグありの場合が66.5%と大きく差が出た。会話フラグなしの場合、会話していなくても同じ位置にいれば会話したと判断しているため、検出精度は低くなりやすい。したがって、会話が少ない個人作業スペースでは会話フラグの使用が効果的だと言える。なお、会話フラグを用いた場合でも、両スペースともに4割弱が誤検出となるのは、会話が生じている位置で他に会話に参加していない者がいる場合でも、会話していると判断されるためだと思われる。加えて、電話での会話、タグを携帯していない部外者との会話も誤検出が増える要因と考えられる。

検出率については会話フラグありの方が微減した。これは、会話の始まりと終わりでは計測単位の1分間で会話している時間が短く、会話フラグが発生しない場合があるためだと思われる。また、会話フラグなしの場合でも未検出が約2割ある。これは、複数の位置領域を跨いで交わされる会話であると思われる。したがって、未検出を減らすには隣接する位置にいる者も検出する必要があるが、単純に検出領域を拡大すれば同じ位置にしながら会話に参加していない者の割合も増えるため、個人作業スペースについてはさらに位置識別の分解能を高める必要があると考えられる。

表2 検出精度と検出率

	会話 フラグ	総検出数(A) [人・分]	実会話数(B) [人・分]	正検出数(C) [人・分]	誤検出数 [人・分]	未検出数 [人・分]	検出精度 C/A	検出率 C/B
打合せ スペース	あり	348	328	226	122	102	64.9%	68.9%
	なし	410		254	156	74	62.0%	77.4%
個人作業 スペース	あり	346	370	230	116	140	66.5%	62.2%
	なし	6132		288	5844	82	4.7%	77.8%

次いで、各ワーカー間の会話量の再現度について検証する。会話フラグありと会話フラグなしのそれぞれの方法で得られたデータと正解データを基にして作成した近接性のネットワークグラフを表3に記す。表4はワーカー間の会話量の散布図で、推定した会話量を横軸、実際の会話量を縦軸とする。データの分布が直線 $y = x$ に近いほど、実際の会話量をより良く再現できていると言える。

打合せスペースは会話フラグの使用が検出精度および検出率に影響しなかったように、ネットワークグラフと散布図においても差はなく、実際に会話量の多いワーカー同士を正しく表現できている。また、散布図は全体に直線 $y=x$ に近い分布となっている。個人作業スペースについては会話フラグなしの場合は、実際と乖離した結果になっている。一方、会話フラグありの場合は、実際に会話量の多いワーカー同士を正しく表現できている。しかし、本来は会話のないワーカー同士に引かれた線も目立つ。また、散布図は検出回数が10分未満の範囲で特に広がって分布している。実会話数が少ないほど誤検出や未検出の影響が大きいため、計10分未満の会話を検出す

るためには検出精度および検出率のさらなる向上が必要である。

表 3 近接性のネットワークグラフ比較

※頂点の色は各ワーカーの部署内の所属課を表している

表 4 ワーカー間の会話量の測定・正解データの比較

4. まとめ

筆者らはユーザーへの負担を極力軽減するという開発方針のもと、環境側に設置したセンサでワーカーの会話の有無を検知するという特徴を持つ近接性測定手法を開発した。打合せスペースを対象とした場合は、従来の位置情報のみを用いた方法でも一定程度の精度で会話を検出できるが、会話が発生するとは限らない個人作業スペースのような空間では、座席に立ち寄って短時間で終わる報告や打合せを把握するために音圧レベルとの組み合わせが重要であった。Activity Based Working のように働く場所が多様なオフィスでは様々な場所で会話が生じるため、本手法は今後の計画分野の調査において有用であると考ええる。一方、実証実験では複数の位置領域を跨いで交わされる会話や短時間の会話の未検出が確認された。今後は計測方法を改良して、様々な場所で生じるコミュニケーションを正確に検出できるようにしたい。

注

注1 ワーカー同士に方向性を持たない場合、隣接行列(正方行列)の上三角成分と下三角成分は同じ値となる。また、自分自身との会話も考慮しないため、対角成分は全て 0 となる。辺リスト表現の場合、二人のワーカーの組を入れ替えた列と自分自身との組み合わせの列を省略できる分、簡潔に表現できる。

注2 測位方式によってはゾーンが明確でないこともある。例えば、環境側に場所と紐づけた受信機を複数設置し、電波の受信強度をもとに最も近くにある受信機を推定する方式の場合、電波の受信強度が他の通信機器との干渉、什器や人による反射、回折、減衰などの影響を受けるため、位置識別の境界は曖昧である。

参考文献

1) Simon, H. A.: Administrative behavior: A study of decision-making processes in administrative organizations (4th Edition). New York; NY: The Free Press., p211, 1997

2) Allen, Thomas J.: Managing the flow of Technology: Technology Transfer and the Dissemination of Technological Information Within the R&D Organization, Cambridge, MA: The MIT Press, 1977

3) 阿部智和: 人員間の距離とコミュニケーション・パターンに関する実証分析: ある国内電機メーカーを対象として, 長崎大学経済学会「経営と経済」, 第 88 巻第 1 号, pp. 27-50, 2008

4) Yokoyama, M., et al.: A Study of Supportive Tools for Behavioral Observation in Office Environments, AIJ Journal of Technology and Design (Kyusyu), pp. 555-556, 2007.8 (in Japanese)

横山宗樹, 佐治正宏, 松本裕司, 仲隆介, 山口重之: オフィス環境における行動調査支援ツールに関する研究(その 2) — "ワーカーのたまり状態"の検出からコミュニケーション行動の抽出—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 555-556, 2007.8

5) Nishihara, Y., et al.: A Study on Detection of Position and Direction with Picture Marker in Office Part 1, pp. 479-480, 2014.9 (in Japanese)

西原惟仁, 中野健太, 松本裕司, 仲隆介: オフィスにおける画像マーカーを用いたワーカーの位置と方向検知に関する研究 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) pp. 479-480, 2014.9

6) Numanaka, S., et al.: Quantitative Evaluation of Workers' Communication in Office Using Card/Badge Type Wearable Terminal (Part 2) Results of speaking time and ratio, AIJ Journal of Technology and Design (Kyusyu), pp. 5-6, 2016.8 (in Japanese)

沼中秀一, 加藤信介, 高橋幹雄, 黒木友裕, 天野健太郎, 菊池卓郎, 谷英明, 高橋祐樹: カード型・バッジ型ウェアラブル端末を用いたオフィス内コミュニケーションの定量的評価(第 2 報)測定結果(発話時間と発話率), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 5-6, 2016.8

7) Igarashi, Y., Sadakiyo, K.: Study on Smart Workplace Part2: Application of Location Information System in Workplace, AIJ Journal of Technology and Design (Kanto), pp. 477-478, 2011.8 (in Japanese)

五十嵐雄哉, 貞清一浩: スマートワークプレイスの開発: その 2: ワークプレイスにおける人の位置情報システムの活用, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 477-478, 2011.8

[2020 年 2 月 5 日原稿受理 2020 年 6 月 19 日採用決定]