

入退室管理のための存在確率計算モデル

日 野 英 逸[†] 高 橋 健 太[†] 磯 部 義 明[†]

個人情報保護法などの施行を受け、オフィスのアクセスコントロールに対するニーズが高まる一方、それに伴う利便性低下が問題となる。この問題に対し本報では、入退室管理システムへの適用を前提とした、ユーザの存在確率計算モデルを提案する。具体的には、防犯カメラ等による人流の検知を行い、これをもとに入室要求者がどのユーザであるかの確率（存在確率）を計算する。存在確率と顔識別技術を組み合わせることで、より高い精度の認証をハンズフリーで実現する入退室管理システムの構築が見込まれる。

Entry-Control Systems Using Probability of Presence

HIDEITSU HINO,[†] KENTA TAKAHASHI[†] and YOSHIAKI ISOBE[†]

After the enforcement of the Private Information Protection Law, entry-control systems enjoy an increasing demand, which may decrease the convenience for the users. We present an entry-control system which doesn't prevent users activities, utilizing the probability of presence of the users. We formalize the method to calculate the probability of presence, using the human flow detection by surveillance cameras in the under controlled area.

1. はじめに

従来、IC カードや無線タグなどを利用したオフィスや重要施設向けの入退室管理システムが製品化されているが、近年の情報漏洩の増加と、個人情報保護法の施行から、入退室時のより厳密な本人確認が求められている。IC カードや無線タグなどの所有物を利用した本人確認手段は、ユーザの運用に安全性が依存する問題がある。こうした問題を解決するため、本人確認手段としてバイオメトリクスを利用する製品が各社から販売されている¹⁾。

これらの製品は基本的に従来の IC カードによる入退室管理にバイオメトリクスを追加した構成であり、ユーザは入室時に IC カードとバイオメトリクスを提示する必要がある。バイオメトリクスにより厳密な本人確認は可能になるものの、IC カードの提示動作および生体の提示動作（認証動作）を必要とするため、利便性が低下する。

利便性を向上させる方法として、ユーザの認証動作を必要としない遠距離からの顔認証や歩行認証の組み合わせによる方法などが考えられるが、これらの技術は現在研究段階であり、また、IC カードと組み合わせた指紋認証などと異なりユーザの ID が確定していない状況での認証、つまり、1 対 N の認証となることも

あり、十分な精度をもって本人確認できるレベルにならない¹⁾。

本報告では、入退室管理システムへの適用を想定した、存在確率計算の方法をモデル化する。すなわち、ユーザの入退室記録と、管理領域内の通路分岐点に設置した監視カメラによる人流検知情報を利用して、ある地点に、どれだけの確率でユーザが存在するのかを計算する方法を述べる。

想定する入退室管理システムは、ビル全体への入館管理と、ビル内に複数存在する部屋への入退室管理を行うものである。ビル内の各部屋への入室管理における本人認証は、IC カードを利用したビルへの入退館管理装置、顔認証と存在確率によるマルチモーダル認証^{2),3)}を採用する。

本研究の関連研究としては、複数カメラで撮影された人物の確率的な同定技術の研究⁴⁾があるが、画像処理技術により人物の同定を行うことに主眼を置いている。確率論に基づいて建物の内部の人物の位置を推定する研究⁵⁾も行われているが、これはユーザにトークン（赤外線発信機）を持たせ、特殊なセンサーで位置を検出した上で、その直後の移動を推定するものである。また、人物の歩行モデルを立てて挙動を解析・予測する研究が古くから行われているが⁶⁾ いずれも群集をモデル化しているものである。これらの研究に対し、入退室の記録とカメラによる人物通過記録を利用した存在確率と顔認証を用いた、マルチモーダルの入退室管理方式を提案する。本報告では、存在確率モデ

[†] (株) 日立製作所 システム開発研究所
Hitachi, Ltd., Systems Development Laboratory.

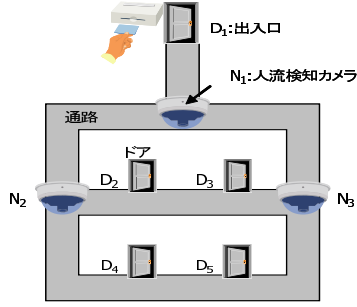


図 1 管理領域の例

Fig. 1 Example of controlled area

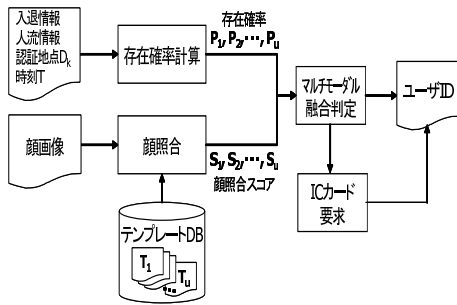


図 2 ユーザ識別処理

Fig. 2 User identification procedure

ルについて以下に説明する。

2. 問題のモデル化と存在確率計算

2.1 問題のモデル化

入退室管理システムにおけるユーザの識別問題をモデル化する。例として、図 1 に示すビルの 1 フロアを考える。\$D_1\$ はビルの出入口であり、ユーザが提示する IC カードにより ID を識別して、時刻と入退の記録を残す。\$D_2, \dots, D_5\$ は各部屋へのドアであり、顔認証および存在確率によりユーザを識別し、ドアに入ったユーザの ID と時刻を記録する。またドアを出る際にも顔認証あるいは IC カードによってユーザを識別する。このようにビルの出入口および各ドアにおいて記録される情報を、入退情報 \$E\$ とする。また通路の各分岐点には人流検知カメラ (\$N_1, N_2, N_3\$) が設置されているものとし、ユーザが通過した際に通過方向、時刻を記録する。この記録を人流情報 \$F\$ とする。このとき、ユーザを \$U_i, i = 1, \dots, u\$ とし、ある時刻 \$T\$ においてあるドア \$D_{k_0}\$ に入ろうとするユーザが現れたとき、このユーザが \$U_i\$ の中の誰であるかを、カードの提示や ID 番号入力などなしに判定することが課題である。ドア前で行われるユーザ識別処理の流れを図 2 に示す。ドア前にてユーザの顔画像の撮影が行われると、撮影された画像と、事前に登録してあるユーザ

\$U_1, \dots, U_u\$ の顔情報 (テンプレート) \$T_1, \dots, T_u\$ との照合により、照合スコア \$S_1, \dots, S_u\$ が計算される。同時に、入退室情報、人流情報等を利用して、ドア \$D_{k_0}\$ の前のユーザが \$U_i\$ である確率 \$P_i, i = 1, \dots, u\$ が計算される。その後、存在確率 \$P_i\$ と照合スコア \$S_i\$ を用いた融合判定技術により、ユーザが識別される。

存在確率を求めるために、まず、以下のように記号を定義する。

- \$T\$: 認証要求の発生時刻。
- \$D_{k_i} (i = 1, \dots, u)\$: ユーザ \$U_i\$ の出発地点。
- \$t_i (i = 1, \dots, u)\$: \$U_i\$ の出発時刻。
- \$R_l^i (l = 1, \dots, r_i)\$: \$D_{k_i}\$ から \$D_{k_0}\$ への経路。
- \$Ar\$: 時刻 \$T\$ において \$D_{k_0}\$ にいずれかのユーザが到着する事象。
- \$Ar_i\$: ユーザ \$U_i\$ がドア \$D_{k_0}\$ に到着する事象。
- \$De_k^i\$: \$U_i\$ が \$D_k\$ を目的地とする事象。
- \$Ro_l^i\$: \$U_i\$ が経路 \$R_l^i\$ を選択する事象。

時刻 \$T\$ にドア \$D_{k_0}\$ で認証要求が発生した (事象 \$Ar\$ を観測した) ときに、それがユーザ \$U_{i_0}\$ である確率は、条件付確率 \$P(Ar_{i_0}|Ar)\$ として表すことができる。存在確率の計算には、入退情報 \$E\$ および人流情報 \$F\$ を利用することができる。従ってユーザの存在確率 \$P_{i_0}\$ は以下の条件付確率として表すことができる。

$$P_{i_0} = P(Ar_{i_0}|Ar, E, F) = \frac{P(Ar_{i_0}, Ar, E, F)}{P(Ar, E, F)}. \quad (1)$$

2.2 問題の分割

次に、ベイズの定理を用いて、ユーザの存在確率を幾つかの確率の積に分解する。\$Ar_i \cup Ar_j = \phi, (i \neq j)\$, \$\bigcup_{i=1}^u Ar_i = Ar\$ より、式 (1) の右辺は以下の様に変形できる。

$$\frac{P(Ar_{i_0}, Ar, E, F)}{P(Ar, E, F)} = \frac{P(Ar_{i_0}, E, F)}{\sum_{i=1}^u P(Ar_i, E, F)}. \quad (2)$$

入退情報 \$E\$ よりユーザ \$U_i\$ の出発地点 \$D_{k_i}\$ を特定することができる。\$D_{k_i}\$ から \$D_{k_0}\$ に向かう経路が \$r_i\$ 通りあるとし、それらを \$R_l^i (l = 1, \dots, r_i)\$ と表す。時刻 \$T\$ にドア \$D_{k_0}\$ に到着したユーザが \$U_i\$ であったと仮定した場合、\$U_i\$ は経路 \$R_l^i\$ の何れかを通ったはずである。従って式 (2) の右辺は以下の様に変形できる。

$$\frac{\sum_{l=1}^{r_{i_0}} P(F|Ar_{i_0}, E, Ro_l^{i_0}) P(Ar_{i_0}|E, Ro_l^{i_0}) P(E, Ro_l^{i_0})}{\sum_{i=1}^u \sum_{l=1}^{r_i} P(F|Ar_i, E, Ro_l^i) P(Ar_i|E, Ro_l^i) P(E, Ro_l^i)}. \quad (3)$$

ここで確率 \$P(Ar_i|E, Ro_l^i)\$ に着目する。事象 \$Ar_i\$ が起きるためには、時刻 \$T\$ においてユーザ \$U_i\$ が通路上に存在しなくてはならないが、その存在の有無は入退情報 \$E\$ から決定することができる。

次に確率 \$P(E, Ro_l^i)\$ に着目する。入退情報 \$E\$ は \$U_u\$ の経路選択に関して何の情報も持たないため、この確率は独立事象の確率の積として、\$P(E, Ro_l^i) = P(E)P(Ro_l^i)\$ のように表せる。事象 \$Ro_l^i\$ は、\$D_{k_i}\$ を出発したユーザ \$U_i\$ が、\$D_{k_0}\$ へ向かう複数の経路 \$Ro_l^i (l = 1, \dots, r_i)\$ の中で、特定の経路 \$R_l^i\$ を選択する

事象である。事象 R_l^i が生起するためには、まずユーザ U_i が D_{k_0} を目的地に定める必要がある。つまり事象 Ro_l^i は事象 $De_{k_0}^i$ を含み、その生起確率は次式で表される。

$$P(Ro_l^i) = P(Ro_l^i, De_{k_0}^i) = P(Ro_l^i | De_{k_0}^i) P(De_{k_0}^i). \quad (4)$$

以上の考察により、式 (3) は次式の様に変形することができる。

$$\frac{\sum_{l=1}^{r_{i0}} P(F, Ar_{i0} | E, Ro_l^{i0}) P(Ro_l^{i0} | De_{k_0}^{i0}) P(De_{k_0}^{i0})}{\sum_{i=1}^u \sum_{l=1}^{r_i} P(F, Ar_i | E, Ro_l^i) P(Ro_l^i | De_{k_0}^i) P(De_{k_0}^i)}. \quad (5)$$

結局、存在確率を計算するためには各ユーザ U_i に対して以下の各確率が計算できればよいということになる。

- (1) 目的地選択確率: $P(De_{k_0}^i)$
- (2) 経路選択確率: $P(Ro_l^i | De_{k_0}^i)$
- (3) 人流観測確率: $P(F, Ar_i | E, Ro_l^i)$

次節にて、各々の確率の計算方法を示す。

2.3 目的地選択確率の計算方法

D_{k_i} を出発したユーザ U_i がドア D_{k_0} を目的地とする確率は、過去の入退情報から推定するか、過去の入退情報がない場合は各ドアを選択する確率は全て等しいと仮定し、 $P(De_{k_0}^i) = 1/(d-1)$ とする。

2.4 経路選択確率の計算方法

経路選択確率 $P(Ro_l^i | De_{k_0}^i)$ は、 D_{k_i} から D_{k_0} に向かうユーザ U_i が、経路 Ro_l^i を選択する確率である。ユーザは、目的地までの距離が短い経路をより高い確率で選択すると考えられる。そこで各経路の選択確率は、経路の長さに反比例するものと仮定する。つまり D_{k_i} から D_{k_0} に向かう経路を Ro_l^i ($l = 1, \dots, r_i$) とし、各々の長さを $Length(Ro_l^i)$ とするとき、経路選択確率は以下の式で計算する。

$$P(Ro_l^i | De_{k_0}^i) = \frac{1/Length(Ro_l^i)}{\sum_{l=1}^{r_i} 1/Length(Ro_l^i)}. \quad (6)$$

2.5 人流観測確率の計算方法

人流観測確率 $P(F, Ar_i | E, Ro_l^i)$ は、ユーザ U_i が経路 Ro_l^i を通って D_{k_0} へ向かったとき、人流情報 F が記録された状態で、時刻 T に到着する確率である。 E に含まれる情報の中で、事象 Ar_i に影響を与えるものは、 U_i の出発時刻 t_i のみと考えると、考察すべき確率は

$$P(F, Ar_i | U_i \text{ が } t_i \text{ に入場, } U_i \text{ が経路 } Ro_l^i \text{ を通る}) \quad (7)$$

となる。

式 (7) の計算方法の説明のために、ユーザ U_i が時刻 t_0 にビルに入館し、人流検知カメラ N_1, N_2 を含む経路 R を通って時刻 T にドア D_{k_0} に到着する事象を考える。このとき、人流検知カメラによる人流情報 F としては、 N_1, N_2 がそれぞれ F_{N_1}, F_{N_2} を記録しているとする。

ここで、ユーザ U_i が時刻 t_0 に D_{k_i} を出発し、経路 $D_{k_i} \rightarrow N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow D_{k_0}$ で時刻 T にドア D_{k_0} に到着したと仮定する。このとき、人流検知カメラ N_1, N_2

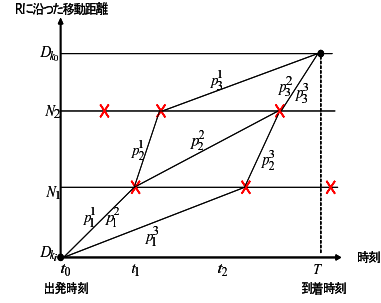


図3 経路上のトレース図

Fig. 3 Trace diagram on a specific root path

が記録したログの中から、ユーザ U_i によって残されたものでありうるログを繋ぐことで、「経路 R 上の、ユーザ U_i の移動パターン」が一般に複数得られる。これらを、「トレース」と呼び、出発点・人流検知カメラ・到着地点で区切られる部分を「部分トレース」と呼ぶ。図3に、現在仮定している状況で、ユーザ U が残した可能性のある人流検知ログを線でつないだ図を記す。図3の折線についているラベル p_j^i は、その部分トレースをユーザが取った確率(部分トレース確率)である。全ての部分トレース確率を計算し、その積として、あるトレースに沿ってユーザが移動した確率を求めよう。

ユーザの各瞬間の歩行速度 v は一定でないことに注意する。そこで、全ユーザの平均歩行速度が $f(v)$ に従うと仮定して、分布 $f(v)$ に従った平均速度でユーザが移動したとする。このとき、出発地から N_1 まで経路 R に沿って移動したとすると、ユーザが N_1 に到着した時刻 t_1 からのゆらぎの分布 $g_1(t)$ は、

$$Pr("U \text{ が時刻 } t \leq \tau \text{ に } N_1 \text{ に到着}") = \int_{-\infty}^{\tau} g_1(t) dt \quad (8)$$

である。さらに、 $F(t)$ を $f(t)$ の原始関数として、

$$Pr("U \text{ が時刻 } t \leq \tau \text{ に } N_1 \text{ に到着}") \quad (9)$$

$$= Pr("U \text{ の平均速度が } l_1/\tau \text{ 以上}") \quad (10)$$

$$= Pr\left(\frac{l_1}{\tau} \leq E(v)\right) \quad (11)$$

$$= \int_{l_1/\tau}^{\infty} f(v) dv = F(\infty) - F(l_1/\tau) \quad (12)$$

となるので、

$$\int_{-\infty}^{\tau} g_1(t) dt = F(\infty) - F(l_1/\tau) \quad (13)$$

の両辺を τ で微分することで、 $g_1(\tau) = \frac{l_1}{\tau^2} f(l_1/\tau)$ を得る。

こうして得られたゆらぎの確率を、人流検知記録のもとでユーザが該当する部分トレースに従って移動した確率とみなす。例えば二点 A, B の間の距離が d 、 A を出発した時刻が T_A 、 B に到着した時刻が T_B であるとき、あるトレースに含まれるこの二点間の部分ト

レース確率は, $p_j^i = d \cdot f(d/(T_A - T_B))/(T_B - T_A)^2$ で与えられる. 簡単のため, 部分トレース確率と部分トレースそのものを同一の記号 p_j^i で表すとする. 図3に記されている状況で, 現在考察の対象としているユーザが取れるトレースは, $p_1^i \rightarrow p_2^i \rightarrow p_3^i$, $i = 1, 2, 3$ の三通りである.

一つのトレースが含む部分トレースの確率の積が, そのトレースに沿ってユーザが移動した確率であり, 全てのトレースに関してその積を加えた値 $\sum_t (\prod_i p_i^t)$ で, あるユーザが現在考えている経路 R に沿った人流検知ログを残した確率を表すとみなす. この積の和を, 管理領域内にいて, 同一のカメラの前を同一の方向に移動しうる全てのユーザについて計算して加えたものを正規化因子 $Norm$ とすると, 人流観測確率が

$$P_c = \frac{\sum_t (\prod_i p_i^t)}{Norm} \quad (14)$$

のように計算できる.

以上のようにして, 目的地選択確率, 経路選択確率 (6), 人流観測確率 (14) を求めることで, 式 (5) によりユーザの存在確率 P_{i_0} が計算できる.

3. 顔照合結果と存在確率の融合判定

ある時刻にあるドアへの入室要求が発生した時, ユーザ U_i , ($i = 1, \dots, u$) の存在確率が P_i , ($i = 1, \dots, u$), ドア前に行った顔照合のスコアが S_i , ($i = 1, \dots, u$) であったとする. これらの情報を融合し, ユーザを識別するアルゴリズムを提案する. まず, 顔照合スコアを観測情報としたときのユーザ U_i の条件付存在確率 $P(U_i|S_1, \dots, S_u)$ を計算する. ベイズの法則により次式が成立する:

$$P(U_i|S_1, \dots, S_u) = \frac{P(S_1, \dots, S_u|U_i)P(U_i)}{\sum_{i=0}^u P(S_1, \dots, S_u|U_i)P(U_i)} \quad (15)$$

ここで事前確率 $P(U_i)$ は前節で計算した存在確率 P_i である. $S_1, \dots, S_u$ は独立であると考えられるので, $P(S_1, \dots, S_u|U_i) = \prod_{j=1}^u P(S_j|U_i)$ が成立すると考えられる.

ここで, 本人同士, 他人同士の顔画像照合スコア分布をそれぞれ $f_G(S)$, $f_I(S)$ とおくと, $P(S_i|U_i) = f_G(S_i)$, $P(S_j|U_i) = f_I(S_j)$, ($i \neq j$) なので,

$$\prod_{j=1}^u P(S_j|U_i) = f_G(S_i) \cdot \prod_{j \neq i} f_I(S_j) \quad (16)$$

となる.

以上より, 顔照合スコアを観測情報としたときのユーザ U_i の条件付存在確率は次式で与えられる:

$$P(U_i|S_1, \dots, S_u) = \frac{P_i \cdot f_G(S_i)/f_I(S_i)}{\sum_{i=1}^u P_i \cdot f_G(S_i)/f_I(S_i)} \quad (17)$$

最後に, 式 (17) で計算された条件付存在確率を, 事前に設定した認証閾値と比較し, 閾値以上ならば入室管理システムはドアを開錠すればよい.

4. おわりに

本報では, ユーザの利便性を確保しつつビル内のセキュリティを高めることを目的に, IC カードと人流検知技術を用いて存在確率を計算し, 顔認証技術と組み合わせてユーザを識別するシステムモデルを検討した. 存在確率の計算は, ビル出入口における IC カード認証情報と, ビル内通路に設置したカメラによる人流検知情報を基に行う. 本報では, ベイズ的アプローチに基づく存在確率の計算アルゴリズムを提案した. また存在確率と顔認証情報からユーザを識別するマルチモーダル融合判定処理に関して, ベイズ的アプローチに基づくアルゴリズムを提案した. 今後の課題は, シミュレーション, あるいは実証実験によって, 提案アルゴリズムの性能を検証することである.

参考文献

- 1) 瀬戸洋一: サイバーセキュリティにおける生体認証技術, 共立出版 (2002).
- 2) 高橋健太: マルチモーダル生体認証技術の現状と逐次確率比検定によるアプローチ, ユビキタス社会におけるバイオメトリクスセキュリティ研究会 (2003).
- 3) 坂野鋭, 劉偉傑: 多重バイオメトリクスによる個人認証, 情報研報, 99-CSEC-5, pp.37-42 (1999).
- 4) V.Kettnaker and R.Zabih: Bayesian Multi-camera Surveillance, *IEEE CVPR*, Vol.2, pp. 253-259 (1999).
- 5) 伊藤孝行, 大栗和久: 確率推論に基づく位置情報推定システムの実現, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.12, pp.2792-2804 (2004).
- 6) S.Okazaki and S.Matsushita: A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing, *Proc. of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*, pp.271-280 (1993).