

端末側での適応的通知タイミング制御の実現に向けた 通知情報調査システムの構築と調査結果

高城 賢大¹ 松田 裕貴^{1,2} 荒川 豊^{1,3} 安本 慶一¹

概要: コンテキスト認識による割り込み通知は多く研究されているが、既存研究の多くは、対象となるアプリ以外は通知タイミングを制御しないアプリと想定している。しかし、対象のアプリ以外にも同様の通知タイミングで制御される場合、割り込みタイミングの一極集中が発生し、通知タイミング制御の効果が発揮されないことが考えられる。また、インストールされているアプリがユーザ毎に異なるため、コンテキスト認識だけでなく、ユーザの端末に導入されている全てのアプリの挙動を考慮した通知タイミングの制御が必要であると考えられる。本研究では、コンテキストに加え、全てのアプリの挙動を考慮した通知タイミング制御を適応的通知タイミング制御と定義し、これの実現に向け、ユーザが受け取る通知の多様性調査を行った。本稿では、プライバシーを排除しつつ通知情報を取得し続けるシステムを作成し、クラウドソーシングを用いて実際に収集した実験結果を報告し、適応的通知タイミング制御を実現するアプリケーションの実現方法について議論する。

Design and Implementation of Notification Information Survey System and Survey Results toward Use-side Adaptive Notification Management

KENTA TAKI¹ YUKI MATSUDA^{1,2} YUTAKA ARAKAWA^{1,3} KEIICHI YASUMOTO¹

1. はじめに

モバイル通知はアプリケーションがユーザに対して能動的に情報通知を行う重要な手段であるが、ユーザが受け取る情報の数は年々増大している。しかし、人間が認知できる情報の量は変わらないため、不適切なタイミングでの通知は、ユーザのストレスの増加や生産性の低下を引き起こしてしまう。そこで、コンテキスト認識を活用した最適なタイミングでの割り込みに関する研究が多く行われている。大越らは機械学習に基づく解析により、プッシュ通知がクリックされやすいブレイクポイントをユーザの行動の節目に検知する手法を提案している [1]。また、赤池らは応答時間帯と受信者の忙しさに基づいた通知によりユーザの

クリック率を向上させる手法を提案している [2]。

これらの手法に基づきタイミングの制御を行うことで、通知に対するユーザの応答率を向上させることが可能になることが明らかになった。しかし、制御対象となる単一のアプリだけでなく、スマホ内の複数のアプリケーションが全て同様の制御を行った時、有限な資源である人間一人の注意（アテンション）に対し一極集中化が起ってしまうことが考えられる。この問題を解決するためには、ユーザー一人一人の全ての通知に対する挙動を考慮した制御を行う必要があると考えられる。しかし、ユーザ端末にインストールされているアプリの種類や、そのアプリに対する通知の許可状況はユーザごとに異なるため、端末内に存在するアプリを知り得ないサービスプロバイダ側がこれを考慮して制御を行うのは困難である。実際に Yahoo と共同で行われている大越らの研究 [1] の実験系においても、制御対象である Yahoo 社のアプリ以外は未制御の通常アプリとして想定している。そのため、もし他の複数アプリのすべてが検知されたブレイクポイントに対して通知を行った時、その制御パフォーマンスに悪影響を与える可能性があ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

² 日本学術振興会特別研究員 DC1
JSPS Research Fellowships for Young Scientists, DC1

³ JST さきがけ
JST Presto

る。そこで、本研究では、ユーザの端末に存在する全てのアプリの通知に対するユーザの挙動を調査した上で、端末側で通知タイミングを中立的に個人最適化する手法を検討する。これを適応的通知タイミング制御と呼ぶ。

本研究では、適応的通知タイミング制御の実現のために、ユーザが受け取る通知の多様性とそれぞれに対する挙動を調査するため、プライバシーを排除しつつ全種類の通知情報を取得し続けるシステムの構築を行った。さらにそれを用いて、クラウドソーシングで募集した一般ユーザを対象に4週間の調査を行ない、実験参加者20人から28日間で95,910件の通知データを収集した。収集したデータセットに対し、統計解析を行ったところ、通知応答率はアプリの種類に依存し、反応時間にはアプリの種類と通知受信時の場所が影響を及ぼすことがわかった。また、アプリの通知開封はそのアプリの通知タイミングだけではなく、他のアプリの通知との組み合わせにも関係があり、他のアプリの通知によってアプリの開封が誘起されている可能性があることが新たに分かった。さらに、適応的通知タイミング制御における課題を整理するとともに、端末側での個人最適化を実現するための要件をまとめた。

2. 関連研究

2.1 通知割り込みに関する研究

モバイル端末からの情報通知は、ユーザに対する「割り込み」と見なすことができる。この「割り込み」がユーザにとって不適切なタイミングで行われた時、ユーザのストレスの増加や生産性の低下を引き起こしてしまうことが報告されている [3][4]。

この問題を解決するために、大越らはプッシュ通知が開封されやすい「ブレイクポイント」を機械学習に基づき検知し、スマートフォンが受信した通知をその瞬間にずらして発火させる事により、通知への反応時間を短縮する手法を提案している [1]。また、赤池らは応答時間帯と機械学習に基づいて検知した受信者の「忙しさ」を考慮した通知によりユーザの応答性を向上させる手法を提案している [2]。

2.2 通知の個人最適化に関する研究

上記の研究はサービスのプロバイダ側が対象のアプリをユーザのコンテキストを元に制御する事で応答率をあげようとする手法を提案しているが、端末側で受け取った通知情報を元にデバイスのコンテキストを分析する研究も行われている。コンテキストアウェア・コンピューティングの普及とモバイル端末の飛躍的な性能の向上により、旧来の様にモバイルユーザ全員に対して同じサービスを提供するのではなく、端末側でユーザー一人一人の行動や環境に適合したチューニングを行いながら、サービスを提供することができる時代になった。Hoらは通知タイミングを個人毎に最適化するための手法として、ユーザコンテキストを使

用した、強化学習ベースでの通知タイミングのパーソナライゼーション手法を提案している [5]。

2.3 Notification Listener Service API を利用した研究

Android 端末では「Notification Listener Service」 [6] と呼ばれる API を使用することができる。これによって、端末でユーザが通知を受信または削除した時の通知アプリ名、テキストメッセージ、タイムスタンプなど情報を受け取ることができる。Weberらはモバイルデバイスに関する通知研究のために6万人を超えるユーザが使用するオープンソースフレームワークを開発した [7]。また、Sahamiらはユーザやイベントに関する情報を含むメッセージアプリの通知を評価し、ユーザの主観に焦点を当てた通知分析を行った [8]。

2.4 本研究の位置づけ

本研究では端末側での適応的通知タイミング制御実現にむけ、ユーザに対して発信された通知毎に応答率を最大化させるために、端末側でのリアルタイムなコンテキストと全てのアプリに対する反応状況に適用したタイミングの制御を行う手法を検討している。

本稿の位置づけは、次章以降で述べる、スマホ内の全通知をログするアプリを用い、ユーザが受け取る通知の多様性とそれぞれに対する挙動を調査することで本研究の目的である適応的通知タイミング制御の実現可能性を明らかにすることである。

3. 調査システム

本研究において、ユーザの端末に届く通知にどのような多様性があるかを調査するためにユーザの通知情報を端末内に記録できる Android アプリ「Notification Logger」 (図 1) を開発した。以降では、3.1 節にてシステムのアーキテクチャについて述べ、3.2 節にてデータ収集時におけるユーザプライバシーの取り扱いについて述べる。

3.1 システムアーキテクチャ

図 2 にスマホアプリ Notification Logger のシステム構成を示す。本実験ではまず、ユーザが通知を許可している全アプリの通知に対する受信または削除の挙動をバックグラウンドで動作する NotificationListenerService [6] を通じて取得する。そしてその時のユーザの行動と位置情報をそれぞれ、Google Activity Recognition API, Google Fused Location Provider API から取得し端末内に保存する。その後、ユーザ手動で保存したログデータをエクスポートできる仕組みをとっている。2.3 節で述べた関連研究との大きな違いとしては、Android 8.0 以降の最新 OS から取得可能になった通知アクション (通知クリック, 通知削除,



図 1 Notification Logger のスクリーンショット

同一アプリの通知削除など)のロギングに対応している点である。これにより、これまでは通知が消された事しか確認できなかったのに対し、ユーザが通知を開封し中身を確認したかどうか、という通知に対するアクションをロギング可能になっている。本調査では主に、このユーザの通知開封動作を中心とした解析を行う。

3.2 プライバシ情報の排除

表 1 にシステムで収集するデータを示す。NotificationListenerService を用いて通知の受信時と削除時のタイムスタンプとその通知に含まれるアプリ名を取得し、その通知の受信又は削除を通知タイプ、通知に対してユーザが行った操作を通知アクションとして取得した。また、その時のユーザの位置情報を Google Fused Location Provider API から、ユーザの行動を Google Activity Recognition API から取得した。通知に含まれるテキストメッセージも本来は取得することができるが、今回の実験では被験者の参加ハードルを下げるためにメッセージ内容の取得は敢えて行っていない。それでもまだ、収集するデータの中にはユーザが受け取った通知のアプリ名やユーザの位置情報、行動情報など個人情報データが含まれている可能性があるため、今回の調査システムでは、最大限ユーザのプライバシーを考慮した設計としている。具体的には、ロギングしたデータは、自動的にサーバにアップロードされず、端末内に保管する仕組みとした。そして、データ提供の際には、ユーザ自身がロギングされた通知情報を確認し、アプリ単位で提供データの取捨選択できるようにしている。

4. 調査実験

本調査実験ではユーザが受け取るアプリの種類、ユーザのコンテキスト(通知を受け取った時間帯や場所、その時

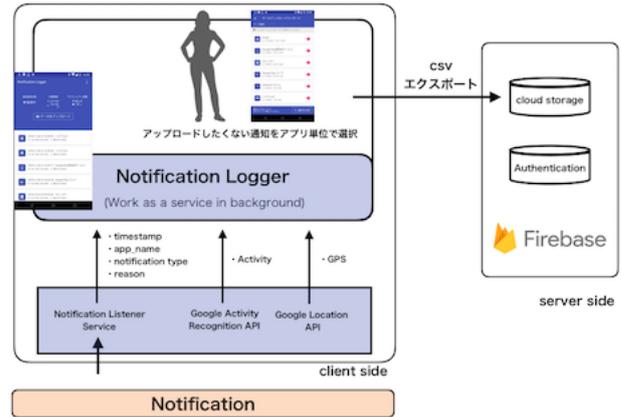


図 2 システム構成図

表 1 収集データ

データ	概要
Timestamp	通知アクション発生時間
位置情報 ^{*a}	通知アクション発生時の GPS 情報 (Latitude, Longitude)
App Name ^{*b}	通知アクションの対象アプリ名
通知タイプ ^{*b}	Posted Removed
通知アクション ^{*b} (Reason code)	REASON_CLICK (1) ^{*c} REASON_CANCEL (2, 8) ^{*d} REASON_APP_CANCEL_ALL (9) ^{*e} REASON_GROUP_SUMMARY_CANCELED (12) ^{*f}
行動認識 ^{*g}	IN_VEHICLE ON_BICYCLE ON_FOOT STILL TILTING UNKNOWN

^{*a} Google Fused Location Provider API を使用

^{*b} NotificationListenerService を使用

^{*c} 通知クリックアクション

^{*d} 通知単一削除アクション。本研究では REASON_CANCEL (2) と REASON_APP_CANCEL (8) は同一のアクションとみなす

^{*e} 通知グループ削除アクション ^{*f} 通知全削除アクション

^{*g} Google Activity Recognition API を使用

の行動)の違いによる、通知の応答性を調査することを目的とする。4.1 節で調査手法について述べ、4.2 で調査条件、被験者の属性について述べる。

4.1 調査手法

本実験では、国内大手のクラウドソーシングサービスである「クラウドワークス」を使用して被験者の募集を行った。応募者の内 20 人を対象に 4 週間のデータ収集実験を行った。被験者には普段から使用している個人の Android スマートフォンに 3 章で述べた「Notification Logger」をインストールしてもらい、位置情報とセンサ情報の取得許可を行ない、通知が監視中になった状態で普段通りの生活を送ってもらった。被験者には 1 週間毎にリマインドを送り、データのアップロードを 4 回に分けて行なっても

表 2 被験者属性

			人数
被験者の属性内訳	性別	男性	7
		女性	13
	年齢	20-29 歳	8
		30-39 歳	9
		40-49 歳	3
	職業	会社員	9
		主婦	6
		フリーター	3
		学生	2
被験者数計			20

表 3 実験結果概要

	項目	結果
概要	総データ数	95,910
	受信件数	68,261
	削除件数	27,649
通知アクション別内訳	通知クリック (開封)	3,506
	通知単一削除	17,634
	通知グループ削除	3,643
	通知全削除	2,769
アプリ種別内訳	メッセージアプリ通知数	22,088
	マネーアプリ通知数	1,908
	ゲームアプリ通知数	337
	ニュースアプリ通知数	434
	マップアプリ通知数	3,456
	OS システム通知数	5,835
	その他 通知数	34,201

らった。

4.2 調査条件

Notification Logger での通知取得で使用している「Notification Lister Service」では AndroidOS のバージョンが Android8.0 以上の端末でしか通知タップ (CLICK, 開封) の挙動を取得することができないため, Android8.0 以上の OS が搭載されている端末を使用している応募者のみを採用した. 表 2 に被験者の属性を示す. 被験者は 20~49 歳までの男女 20 人を対象とした.

5. 調査実験結果と考察

表 3 に実験結果の概要を示す. 本実験では 4 週間で 95,910 件の通知データを取得することができた. 通知データの内訳は, 通知の受信件数が 68,261 件, 通知の削除件数が 20,345 件であった. 削除の内 3,506 件が通知タップ (開封) による削除, 17,634 件がユーザ主導での単一通知の削除, 3,643 件がアプリ単位でのグループ削除機能による通知削除, 2,769 件が通知の全削除機能によるものであった.

また, アプリ名から LINE やメール, SNS など人間とのコミュニケーションがメインの機能となるアプリを「メッセージアプリ」, クラウドワークスやメルカリなど, お金に関わるアプリを「マネーアプリ」, ゲーム系アプリを「ゲームアプリ」, Yahoo ニュースやグノシーなどのニュース系アプリを「ニュースアプリ」, 地図アプリを「マップアプリ」, Android OS 由来のシステムから来る通知を「OS システム」, その他のアプリを「その他」としてジャンル分けを行った.

データの中には OS システムに関する通知はも多く含まれていたが, スマホ上には通知として表示されないものや, アプリのダウンロード動作中等に NotificationListenerService があたかも複数回の通知を受信したかの様に連続してログをキャッチしてしまう現象が多く見られた. そのため本稿では, OS システムに関するデータは取り除き分析を行った.

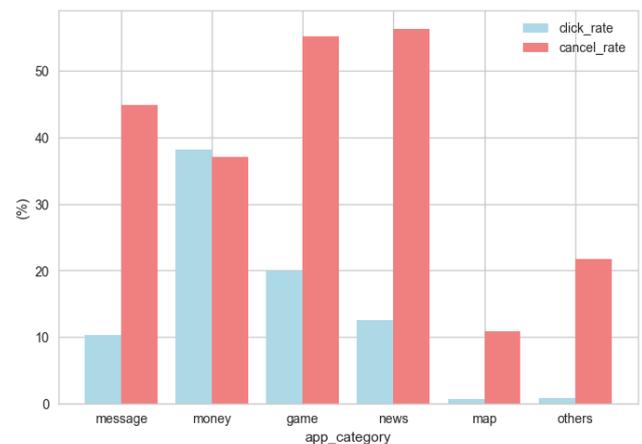


図 3 アプリの種類対する応答率

5.1 アプリの種類ごとの解析結果と考察

カテゴリ分けしたアプリの種類ごとのクリック (開封) 率と通知クリックまでの経過時間を考察する.

■ アプリごとのクリック率

アプリの種類ごとのクリック率を図 3 に示す. グラフからお金に関係が強いマネーアプリのクリック率が高くて高く, 次にゲームアプリ, ニュースアプリと続き, その他を除きもっとも通知件数が多かったメッセージアプリが 4 番目のクリック率となっていた. また, 通知の削除率で比較した時も同様に, マネーアプリはメッセージ, ゲーム, ニュースアプリと比べて削除率が低く, ユーザに通知が受け入れられやすいアプリのカテゴリであることがわかった.

■ アプリの種類ごとの通知クリックまでの経過時間 CDF

通知を受信してからそのアプリがクリックされるまでの経過時間を元に考察を行う. 図 4 に通知の受信からそのアプリがクリックされるまでの経過時間のヒストグラムを示す. 図からクリックが観測された通知の内, そのほとんどが受信してから約 1 時間 (3600s) 以内にクリックされていることがわかる. よって以降は経過時間が 1 時間以内の通知クリックを対象とした解析を行う.

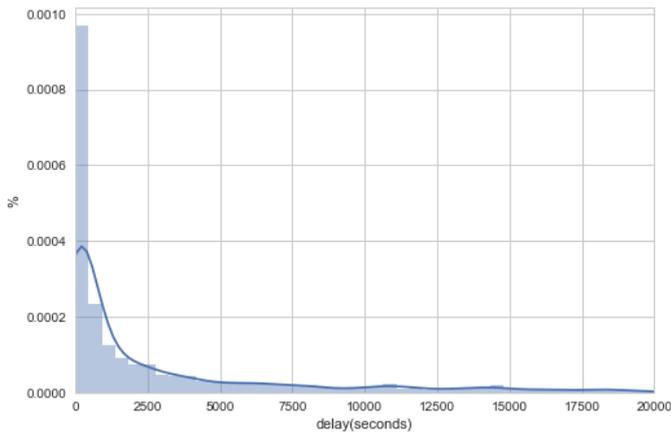


図 4 通知クリックまでの経過時間ヒストグラム

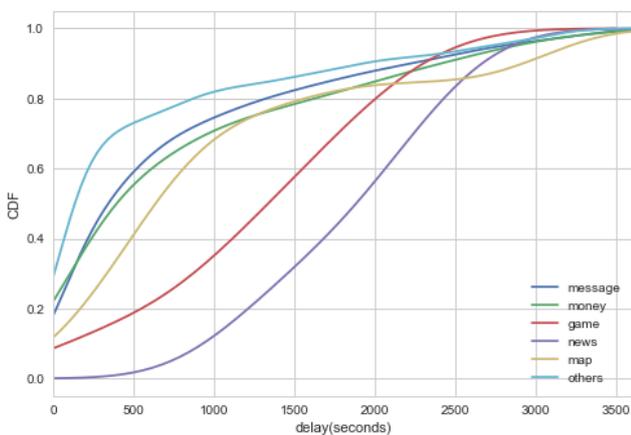


図 5 アプリの種類ごとの通知クリックまでの経過時間 CDF

アプリの種類ごとの通知クリックまでの経過時間における Cumulative Distribution Function (CDF) を図 5 に示す。その他のアプリが最も経過時間が短い結果となったが、図 3 から分かるように、クリック率が極端に少なく、クリックのデータが全体的に少ないことが原因で左側へとグラフが寄ってしまっていることが考えられる。また、グラフから図 3 においてクリック率が最も高かったマネーアプリがメッセージアプリよりも経過時間が長く、その他を除いてはメッセージアプリが最も早くクリックされやすいアプリのカテゴリであることがわかった。

■通知クリックの誘起要因に関する考察

図 6 のように、ユーザによるクリックイベントはそのアプリ自身の通知によって必ずしも引き起こされているとは限らない。例えば、a3 のアプリの通知を受信した時タイミングで、以前に受信していた b1 の通知を思い出してクリックする可能性も検討しなければならない。表 4 にユーザが開封したある通知に対して、直前に受信した通知が同一のアプリである場合と異なるアプリであった場合の通知数を集計した結果を示す。メッセージアプリに関しては経過時間の速さからもわかるように、過半数が通知を受信したことがそのまま瞬時にクリック行動を誘起したと考えら

表 4 3600s 以内にクリックされた通知の直前の通知

アプリ種別	直前の通知が同一アプリ	直前の通知が他のアプリ
メッセージ	1,172	941
マネー	156	503
ニュース	0	49
ゲーム	4	52
マップ	6	15
その他	31	25
合計	1,369	1,585

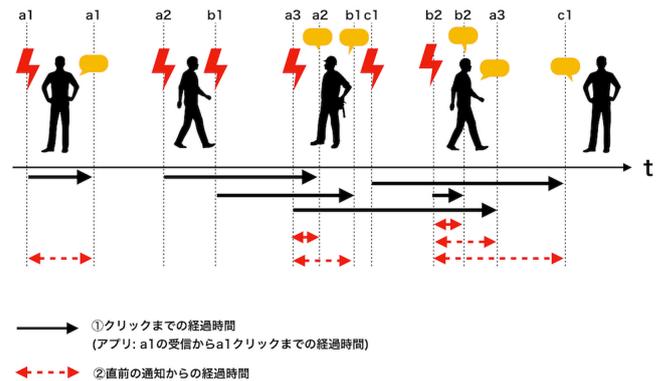


図 6 直前の通知からの経過時間

れる。しかし、マネー、ニュース、ゲームアプリはそのほとんどが、直前に他のアプリからの通知を受け取っており、そのアプリの通知受信タイミングが直接クリック行動に影響しているとは考えられない。

5.2 スポットごとの結果と考察

■ スポットごとのクリック率

ユーザの位置情報を一定の範囲ごとに解析するために、取得した緯度経度の位置情報から GeoHex と呼ばれる尺度への変換を行った。これは世界中を Hex(正六角形) で隙間のなく埋め尽くし、世界中の全ての地点を表現するための尺度である [9]。本研究では、GeoHex Python ライブラリ*1を用い、GeoHex のレベルを中心間距離が約 2.7km となるレベル 6 として変換を行った。変換後のスポットに対しデータ数が多い順に、上からユーザが頻繁に滞在しているスポットとして ID の振り分けを行った。id1 は、それぞれのユーザがもっとも頻繁に滞在していたスポット、id2 はその次に頻繁に滞在していたスポットを表している。変換したスポットの滞在頻度の上位 5 地点におけるクリック率を図 7 に示す。グラフより、id2 は全スポットの中でも 2 番目に高頻度で滞在している場所にも関わらず、クリック率が最も低くなっていることがわかる。

■ スポットごとの経過時間 CDF

スポットごとの通知クリックまでの経過時間 CDF を図 8

*1 <https://pypi.org/project/py-geo-hex3/>

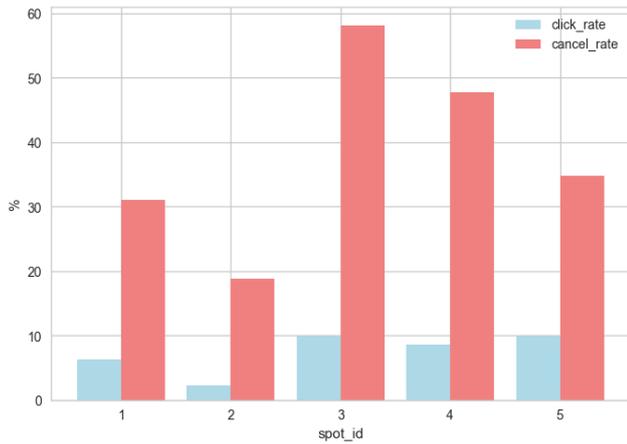


図 7 通知受信上位 5 スポットでのクリック率

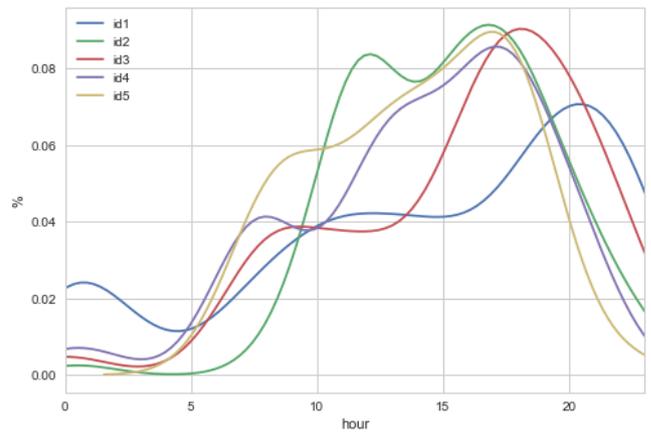


図 9 時間に対するスポットの分布

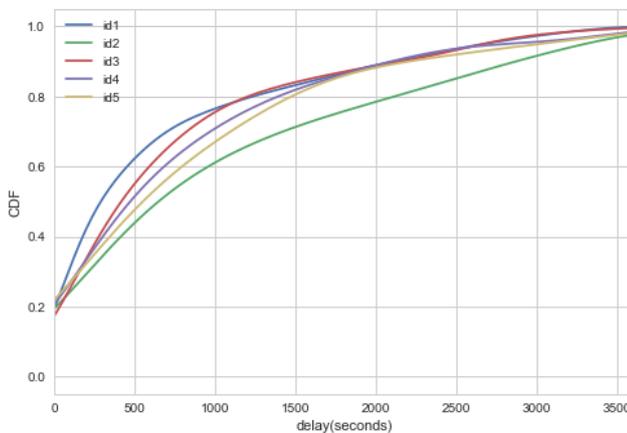


図 8 上位 5 スポットでの通知クリックまでの経過時間 CDF

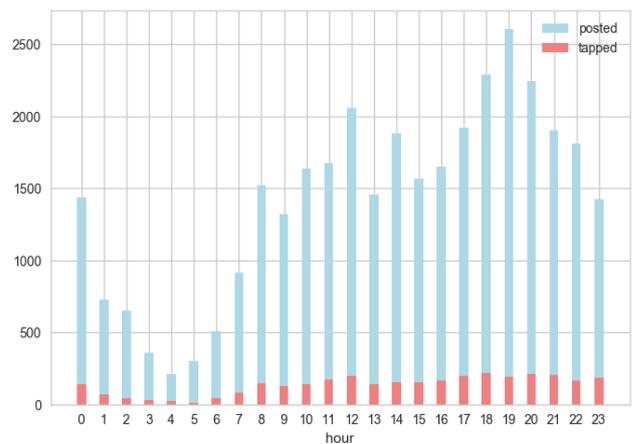


図 10 通知受信時間帯ごとの通知数とクリック数

に示す. id2 はスポットにおけるクリックまでの経過時間が最も長かったことから, 図 7 の id2 における応答率と合わせて, ユーザにとって二番目に高頻度で滞在するスポットは最も通知に応答するのが困難なスポットになる可能性の高いことがわかった.

■ ユーザとスポットの関係性に関する考察

滞在頻度上位 5 位のスポットと時間の関係を 図 9 に示した, スポットの時間ごとの分布から, id1 は深夜によく滞在しているスポット, id2 は統計的にユーザが日中に高頻度で滞在しているスポットになっていることが見てとれる. このことから id1 はユーザの自宅, id2 はユーザにとっての職場や学校などである可能性が高いということが考察できる.

5.3 時間帯ごとの結果と考察

■ 時間帯ごとのクリック率

時間帯ごとのクリック率を 図 10 に示す. グラフから通知の受信数は日中の 12 時と 18 時から 20 時にかけてピークになっていることがわかる, しかしながら, 通知に対するクリック数に関しては一般的な人の睡眠時間である 1 時から 7 時ごろにかけては減少しているものの, それ以外の

時間はクリック数にあまり変化が見られないことがわかる. このことから, ユーザが各時間においてクリックできる通知数に関しては上限があり, それ以上通知を送ってもクリック率は下がってしまう可能性が高いことが考察できる.

6. 適応的通知タイミング制御の実現に向けて

本調査では, アプリを 7 つのカテゴリに分けて調査を行ったが, その中でもマネーアプリにおいては応答率が高いという傾向が, メッセージアプリにおいては通知クリックまでの経過時間が短いという傾向が顕著に見られた. このことから, アプリのカテゴリ分けは適応的のタイミング制御において通知の応答性を予測する上で有効な指標になり得ることが分かる.

表 4 から, アプリの通知タイミングがそのままクリックに繋がっているケースはまだ少なく, 他の通知に誘起されているケースが多いと考察できる. そのため, 単一のアプリだけでなく, 直前に通知された全てのアプリと通知開封との相関関係を今後明らかにすることで, 通知応答をより効果的に誘起するための制御方法を提案できる可能性がある.

また、ユーザにとって二番目に高頻度で滞在するスポットは最も通知に反応するのが困難なスポットになる可能性が高いことが今回の調査で明らかになった。そのスポットを動的に避けるモデルを制御システムに組み込むことで反応率の向上に繋がると考える。

最後に、ユーザが起きている間の単位時間あたりに通知に反応できる数はおおよそ上限が決まっていることが本調査で新たに明らかになった。このことから、「夕方の帰宅タイミングに通知する」といったある時間を狙い撃ちする通知手法はそれほど効果的ではなく、ユーザ個人ごとに単位時間あたりの通知開封数の上限予測が可能になれば、他のアプリからの通知も合わせたリアルタイムな通知の受信状況を考慮し、上限数に近い時間帯は避けて後ろの時間に通知の発火タイミングをずらすなど、適応的な制御によってクリック率をあげられる可能性があることがわかった。

7. おわりに

本研究では、適応的通知タイミング制御の実現に向け、ユーザが受け取る通知を安全に調査できるシステムを開発し、ユーザが受信する全通知の多様性とそれぞれに対するユーザの挙動を調査した。クラウドソーシングで募った20人の被験者を対象に、4週間の調査実験を行い95,910件の通知に関するデータを収集し、統計解析を行なった。通知をアプリ種類ごとに7つのカテゴリに分類し、カテゴリ毎の反応率、通知の受信までの経過時間を解析した結果、お金に関係するアプリへの通知反応率が最も高く、メッセージ系のアプリが最も反応の早いカテゴリであることがわかった。また、GeoHexと呼ばれる位置情報の尺度変換を用いて、ユーザにとって滞在率が高いスポットに対する反応性の解析を行なった。そして、ユーザにとって二番目に高頻度で滞在しているスポットでは通知反応性が大きく低下することが確認できた。また、時間帯に対する反応性調査を解析した結果、通知の受信数には大きな偏りがあるものの、通知クリック数はほぼ横並びで変わらないことが明らかになった。今後は、本実験で得られた解析結果を元に、制御アルゴリズムを構築すると共に、ユーザーに寄り添った端末側での適応的通知タイミング制御システムの実現を目指す。

謝辞 本論文は、JST さきがけの支援のもと実施されている。ここに謝意を示す。

参考文献

- [1] Tadashi Okoshi, Kota Tsubouchi, Masaya Taji, Takanori Ichikawa, and Hideyuki Tokuda. Attention and engagement-awareness in the wild: A large-scale study with adaptive notifications. *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2017*, pp. 100–110, 2017.
- [2] 赤池勇磨, 荒川豊, 諏訪博彦, 安本慶一. 参加型センシング

- の効率化に向けたコンテキストに基づく反応の推定. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 2, pp. 543–552, 2016.
- [3] E. Cutrell, M. Czerwinski, and E. Horvitz. Notification, disruption, and memory: Effects of messaging interruptions on memory and performance. *Proceedings of the INTERACT 2001*, No. 1999, pp. 263–269, 2001.
 - [4] Gloria Mark, Shamsi T. Iqbal, Mary Czerwinski, Paul Johns, Akane Sano, and Yuliya Lutchny. Email Duration, Batching and Self-interruption. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*, pp. 1717–1728, 2016.
 - [5] Bo-jhang Ho, Los Angeles, Mehmet Koseoglu, and Los Angeles. Nurture : Notifying Users at the Right Time Using Reinforcement Learning. 2018.
 - [6] Android developers. 2018. notificationlistenerservice. <https://developer.android.com/reference/android/service/notification/notificationlistenerservice.html>.
 - [7] Dominik Weber and Alexandra Voit. Notification Log : An Open-Source Framework for Notification Research on Mobile Devices. pp. 1271–1278.
 - [8] Alireza Sahami Shirazi, Niels Henze, Tilman Dingler, Martin Pielot, Dominik Weber, and Albrecht Schmidt. Large-scale assessment of mobile notifications. *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*, pp. 3055–3064, 2014.
 - [9] @sa2da. GeoHex - Hexagonal Geo-coding System. <https://sites.google.com/site/geohexdocs/>.