

深度センサを用いたキーボード上の手形状認識に基づく ウィンドウ操作システムの提案

李 俊穆¹ 寺田 努^{1,2} 塚本昌彦¹

概要: 文書作成中のウェブブラウザ閲覧や、プログラミング中のコード検索など、コンピュータ使用時には複数のウィンドウを交互に操作する状況が頻繁に発生する。複数のウィンドウを操作するためには、マウスなどを用いてフォーカスを切り替える必要がある。しかし、マウス操作のためにキーボードのホームポジションから手を離すなどデバイスを持ち替える動作は、タイピングとマウス操作の頻繁な切替えが求められる状況において煩わしく感じられることが多い。そこで本研究では、複数のウィンドウを交互に操作する状況における、精神的負荷の少ないウィンドウ切替えおよび非アクティブウィンドウ操作を実現するため、キーボード全体が映るよう取り付けられた深度センサを用いてキーボード上におけるハンドジェスチャ認識を行う手法と、ジェスチャをウィンドウ操作として利用する手法を提案する。また、提案手法を実装し、タイピング操作とポインティング操作の頻繁な切替えが求められる状況において、マウスおよび提案手法の操作時間と精神的負荷について比較するための実験を行った。その結果、提案手法を用いることで操作時間および精神的負荷が有意に減少することが明らかとなった。

1. はじめに

コンピュータの入力デバイスは、ユーザとコンピュータのインタラクションに重要な役割を果たしており、ユーザの状況に合わせた様々なデバイスが存在する。デスクトップPCでは一般的に文字入力デバイスとしてキーボードを、ポインティングデバイスとしてマウスを用いるが、ノートPCではタッチパッドやトラックポイントを用いることもある。また、プレゼンテーションマウスやペンタブレットなど、特定の場面で用いられる入力デバイスも存在する。加えて、最近ではスマートフォンやタブレットなどのポータブルデバイスの普及によりタッチパネルがポインティングデバイスとして広く用いられており、マイクを用いた音声認識や加速度センサを用いた動作認識にも注目が集まっている。特にハンドジェスチャ認識はポインティング [1][2] や 3DCG の操作 [3] のようなハンドジェスチャによる PC 操作や、手の形状認識による個人認証 [4]、手話認識による障害者のサポート [5][6] など、様々な場面での活用について研究が行われている。また、このようなハンドジェスチャ認識は近年 Kinect[7] や DepthSense[8] など市販の深度センサを用いることで容易に実現できるようになりつつ

ある。

一方、Windows, Mac OS, Linux など現在のオペレーティングシステムにおいてはマルチタスキング環境が標準搭載されており、ユーザは多数の作業を同時に行える。マルチタスキング環境においては文書作成中のウェブブラウザ閲覧や、メール作成中の資料ファイル閲覧など、複数のウィンドウを同時に見ながら作業できる。その際、ユーザの操作の対象となっているウィンドウをアクティブウィンドウと呼び、その他のウィンドウは非アクティブウィンドウと呼ぶ。複数の非アクティブウィンドウから操作したいウィンドウを選ぶためには、ポインティングデバイスを用いる場合、操作したいウィンドウをクリックで選択する必要がある。閲覧している資料を少しだけスクロールさせるような些細な操作のみの場合でも、同様にウィンドウを選択する操作が必要である。また、それらの操作の後に元のウィンドウに作業を戻す場合にも同様の動作が必要となる。このような一時的なポインティング操作のためにキーボードのホームポジションから手を離さなければならないことは、タイピング操作とポインティング操作の頻繁な切替えが求められる状況において煩わしく感じられることが多い。

特に、両手でキーボードを操作する場合はアクティブウィンドウにタイピングするか、文字入力を補助するコピーアンドペーストなど一回性の操作が多く、タイピング

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University
² 科学技術振興機構さきがけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

中にウィンドウを切り替えて操作する時は複数のウィンドウから見たいウィンドウがある場所を選択するか、資料全体をスクロールしながら見渡すなど、アナログかつ連続的な操作が多い。よって、キーボードのみでウィンドウを切り替えながら資料を探すことは難しく、アナログ操作が可能な手法が必要である。

このような問題を解決するため、本研究ではキーボード全体が映るよう取り付けられた深度センサを用いて、キーボード上におけるハンドジェスチャを認識し、ウィンドウ操作命令として利用するシステムを提案する。ハンドジェスチャを非アクティブウィンドウに対する操作命令として利用することで、簡単な操作であればキーボードに手を置いたまま、ウィンドウのフォーカスを変えずに別ウィンドウを操作できる。本論文では、提案システムのプロトタイプを実装し、タイピング操作とポインティング操作の頻繁な切替えが求められる状況下で作業時間と精神的負荷の比較を行った。

本論文は以下のように構成されている。2章で関連研究を紹介し、3章では提案手法について述べる。4章でシステムの実装について述べ、5章で評価実験を行う。最後に6章で本研究をまとめる。

2. 関連研究

2.1 手の認識とジェスチャ操作

センサを用いて手の動きを認識する研究やジェスチャを操作に用いる研究は数多く行われている。塚田らの研究 [9] では、ベンドセンサ、加速度センサ、タッチセンサを用いて、指の曲げ、伸ばしや手首の角度を検出し、実世界のデバイスや PC 画面のウィンドウ、プレゼンテーションを操作する Ubi-Finger が提案されている。土屋らの研究 [10] では、指に色マーカをつけてウェブカメラで認識することで、装着型ディスプレイを用いた環境下でウェブページを操作するシステムが提案されている。しかし、キーボードを使う環境において、このように手にデバイスを装着することはキーボードの操作性を低下させる原因となる。

また、手にデバイスを装着することなく操作に用いるために、カメラから肌色を検出して手の形状を認識する研究が行われている。蔵田らの研究 [11] では、色情報からウェアラブルカメラで手を認識し、仮想リモコンの操作と実環境中の文字情報収集を行うシステムが提案されている。浅田らの研究 [1] では、カメラから手領域を抽出して作成した骨格モデルから得られる各指のなす角と長さ情報を利用して指の動きを認識し、ウェブページを操作するシステムが提案されている。このようにカメラを使って肌色領域からユーザの手を認識し、入力インタフェースとして用いる研究が行われているが、肌色認識は照明環境の影響を受けやすく、特にキーボードは PC のディスプレイの前に置いて操作することが多いため、画面の変化によって認

識率が低下する可能性がある。また、タイピング中は指が曲がっていることが多く、指と指の間隔が狭いため、各指の識別が困難である。上田らの研究 [12] では、複数のカメラから得られた多視点シルエット画像から手形状認識を行うシステムが提案されている。しかし、このシステムは複数のカメラを設置するために大きなスペースを必要とし、設置コストが高く、実用性に乏しい。

一方、Microsoft 社の深度センサ Kinect [7] は、距離画像を用いて照明の影響を受けずに人や物を感知できるため注目が高まっている。石田らの研究 [3] では、Kinect を用いて骨格追跡を行い、自然に 3DCG の回転操作を行うシステムが提案されている。Harrison らの研究 [2] では、深度センサの距離画像から広い平面の判定と指の追跡を行い、プロジェクタで壁やテーブルなどの実世界の平面に操作面を出力し、指でタッチすることで実世界の平面をインタフェースとして用いる OmniTouch が提案されている。しかし、Kinect の測定範囲は最低でも 1m を超えるので、キーボードが認識できる場所に設置するには広いスペースを必要とする。Leap Motion 社の Leap Motion [13] や SoftKinect 社の DepthSense325 [8] は近距離の距離画像を取得できるが、提供される手認識ソフトウェアでは、タイピング時はキーボードと手の位置が近すぎるためキーボード上の手を認識できない。

2.2 ウィンドウ選択とマウス操作

PC の操作において、複数のウィンドウを立ち上げて作業をする場合には多くのウィンドウ操作が必要であることが指摘されており、複数のウィンドウから操作したいウィンドウを少ない操作で選択する手法が研究されている。加藤らの研究 [14] では、スライドボリューム型デバイスを用いて 1 次元の変移を入力し、最上位のウィンドウから入力した変移に比例した枚数分のウィンドウが非表示されるインタフェースのばらばらウィンドウが提案されている。山中らの研究 [15] では、マウスカーソルをウィンドウの奥に潜り込ませ、手前のウィンドウの陰に隠れたウィンドウを簡単に操作できるスイッチバックカーソルが提案されている。Rekimoto の研究 [16] では、テキスト入力とマウス操作が頻繁に切り替わる状況において、マウスを操作するためにキーボードのホームポジションから手を離さなければならないことを指摘し、これを解決する手法としてノート PC のタッチパッドを親指で操作し、キーボードのキーをマウスのクリック代わりに使う ThumbSense が提案されている。しかし、タイピング中に別ウィンドウを操作するためにフォーカスの切替えが必要である問題点は解決できていない。

本研究では、深度センサでキーボード上のハンドジェスチャを認識することで、キーボードから手を離してマウス操作をすることなく、またウィンドウのフォーカスの変更

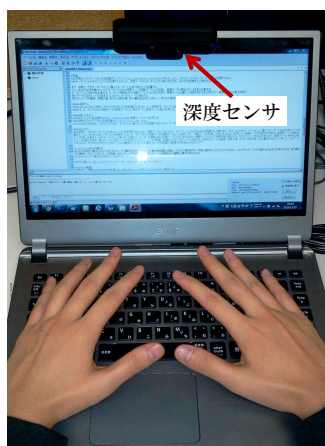


図 1 深度センサの設置図

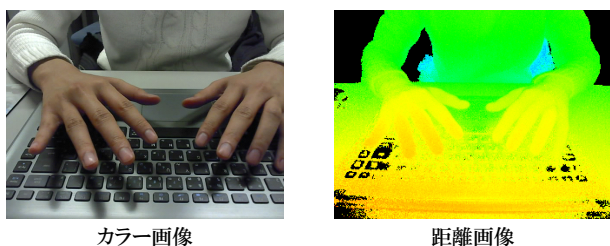


図 2 キーボード上の手のカラー画像と距離画像

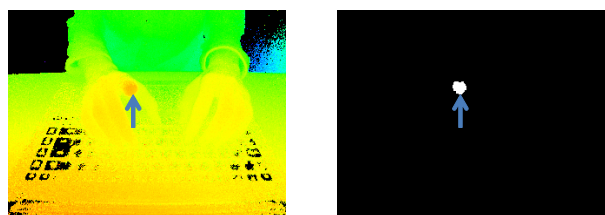
も行わずに、非アクティブウィンドウを非アクティブのまま操作できる手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 指とジェスチャの認識手法

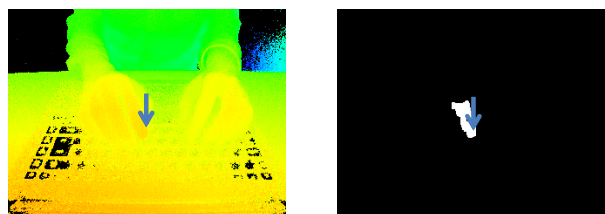
深度センサを用いて手を認識するソフトウェアとして SoftKinect 社の iisu[17], Intel 社の Intel Perceptual Computing SDK[18] などがある。従来の手認識手法はジェスチャ操作のために手のシルエットがきれいに撮影できるように手を動かす手法が一般的である。しかし、タイピング時はキーボードと手は非常に近い位置にあるので、従来手法ではキーボードと手の区別が難しい。本研究では、深度センサを用いてキーボードが映る距離画像の変化を取得し、手の動きによって深度が変化した場所とその深度を評価することでキーボード上のハンドジェスチャを認識する手法を提案する。

深度センサは図 1 に示すように PC の上部に、キーボードがセンサの有効範囲に入るように角度を調整して設置する。深度センサに映るユーザの手のカラー画像と距離画像を図 2 に示す。深度センサで常時距離画像を取得し、前フレームと比較して閾値以上に深度が低く変化した場所のみを表した差分データを 2 値化された画像データとして取得する。差分データにはノイズが含まれるため、差分の領域をスムージングし、ノイズを除去する。キーボード上で指を伸ばして動かすと指が映る場所はセンサから近くなり、深度は低くなる。指が映る場所の深度が低くなるのは指を



距離画像 差分データ

図 3 指を上げた時の距離画像と差分データ



距離画像 差分データ

図 4 指を下げた時の距離画像と差分データ

どの方向に動かしても同じである。指を動かす時の距離画像と深度が低くなった場所を表した 2 値化画像の例を図 3, 4 に示す。ただし、指を下げすぎてキーボードに当たった場合は反応しない。次に指先の座標を取得するために、深度が低くなった領域の中で最も深度が低い点を探し、最低深度点と定義する。指を一本のみ伸ばして動かすと差分データにはその指のみ現れ、その中で深度が最も低く現れる指先が最低深度点となる。指を動かしていない時は差分データには何も現れないが、動かしていないことは判別できるため最低深度点も動かさない。

3.2 ウィンドウ操作手法

前節の手法で認識した指先の位置情報をウィンドウ操作に利用する。指先を上下左右に動かせることからポインティング操作に用いることを考えられるが、前節の手法では指をあまりゆっくり動かすと認識されないため、精密な操作は難しい。また、指で描いた絵を認識しコマンド入力することも考えられるが、指一本だけを振って絵を描くことは負担が大きく、一回性の命令であればショートカットキーを用いることが操作しやすいと思われる。本研究では指の動作を上下左右の 4 種類に分けて、指を動かした方向によって別の操作を割り当てる手法を提案する。

前節の手法のみではタイピング操作をしている時も深度画像に変化が現れ最低深度点を取得してしまうため、ジェスチャ操作をする時としない時を区別するために特定のキーを押している時のみジェスチャを認識する。ジェスチャ操作をする前にあらかじめ指を上げておき、特定のキーを押した時の最低深度点の座標を基準点として設定する。特定のキーを押したまま指を上下左右に動かし、新しく取得した最低深度点と基準点の座標の差から指を動かした方向を算出し、ウィンドウ操作を決める。例えば、指を上げて特定のキーを押したまま指を下に動かすと、サ

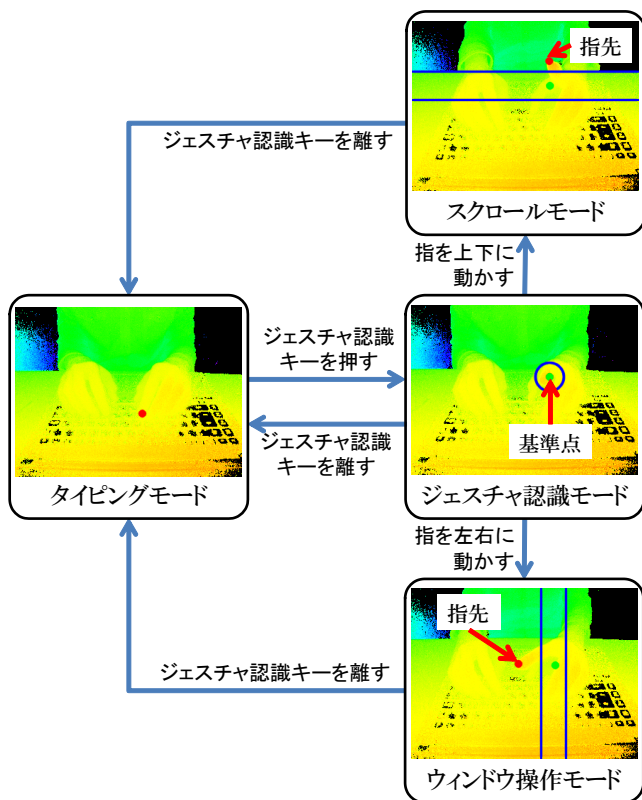


図 5 状態転移図と各モードの画面



図 6 「ウィンドウ選択モード」でのサブディスプレイ画面

ブディスプレイのウィンドウを下にスクロールさせる。実行する操作は、スクロール操作やタブ操作、ウィンドウの前後関係の切替えなどが考えられる。

4. 実装

提案手法に基づいて、SoftKinect 社の深度センサ DepthSense325[8] を用いてシステムのプロトタイプを実装した。DepthSense325 では、カラー画像、距離画像、音声データを取得できるが、本研究では距離画像のみを利用する。PC 側のソフトウェア開発言語として C++ を用いた。深度データの可視化と解析には、Intel 社の画像処理ライブラリ OpenCV[19] を使い、ウィンドウ操作には、Windows API を用いた。

今回の実装ではジェスチャ認識する時としない時を区別

するキーとして「無変換」キーを用いる。「無変換」キーは入力したの日本語文字をひらがな、全角・半角カタカナに変換するキーであるが、同じ機能が F6, F7, F8 キーでもできるため、「無変換」キーを無効にし本システムに用いることにした。以下、「無変換」キーを「ジェスチャ認識キー」と呼ぶ。

今回は資料閲覧に用いられる機能と思われるスクロール操作とウィンドウの前後関係の切替え機能を実装した。本システムの状態変移図と各モードの認識画面を図 5 に示す。図 5 の「タイピングモード」とはジェスチャ認識せずアクティブウィンドウでタイピングする状態である。指を伸ばしてからジェスチャ認識キーを押し始めると「ジェスチャ認識モード」となり、同時に指先の座標を基準点として記録する。基準点から指を上下に動かすと「スクロールモード」となり、サブディスプレイの画面を上下にスクロールする。青色の境界線を基準に上下の領域に指を動かすと指の方向によって上下にスクロールし、真ん中の領域に指を戻すとスクロールが止まる。ジェスチャ認識キーを離すと「スクロールモード」が終わる。「ジェスチャ認識モード」から指を左右に動かすと「ウィンドウ選択モード」となり、サブディスプレイに「Google Chrome」、「Adobe Reader」、「メモ帳」の 3 つのアプリケーションを横に並べ、指を左、真ん中、右に動かしジェスチャ認識キーを離す時に指が向いている方向のウィンドウをサブディスプレイに全体化させる。今回は最もよく使われるウェブブラウザである「Google Chrome」、国際標準化機構によって標準化されている文書ファイルフォーマットである PDF ファイルを読み込める「Adobe Reader」、Windows に内蔵されているテキストソフトの「メモ帳」をウィンドウ選択の対象とした。「ウィンドウ選択モード」の時ウィンドウが並ぶサブディスプレイの様子を図 6 に示す。

5. 評価実験

5.1 実験内容

タイピング操作とポインティング操作の頻繁な切替えが求められる状況において、マウスおよび提案手法を用いた場合の操作時間と精神的負荷について比較するための実験を行った。被験者にはサブディスプレイに全画面表示で重なっている Google Chrome, Adobe Reader, メモ帳のウィンドウにそれぞれ分割して表示された合計約 300 字の文書を、マウスもしくは提案手法を用いてウィンドウ切替え操作やスクロール操作をしながらメインディスプレイの Microsoft Word のウィンドウにタイピングさせ、その操作記録を取得しウィンドウ切替えや画面のスクロールなどタイピング操作以外に要した時間を測定した。実験環境を図 7 に示す。上記の手順を従来手法であるマウス操作と、提案手法で 1 回ずつ行った。タイピングする文書は 4 種類からランダムに決定し、従来手法と提案手法の試行順序もラ



図 7 実験環境

表 1 各被験者のタイピング以外に要した時間

操作手法	A	B	C	D	E	F	平均値
マウス	41	41	35	47	33	42	39.8
提案手法	28	24	39	31	29	34	30.8

表 2 各被験者の NASA-TLX 点数

操作手法	A	B	C	D	E	F	平均値
マウス	51.3	28	37.7	48.3	58.3	64.3	48
提案手法	27	27.3	38.3	16.7	37.7	46.3	32.2

ンダムに決定した。実験を行う前に、15分程度の練習を行い提案手法の操作に慣れさせ、被験者が満足する認識率を保持できるよう、ジェスチャの閾値を調節した。

また、実験後、NASA-TLX(NASA Task Load Index)[20]を用いて各手法の精神的負荷の測定を行った。NASA-TLXとは、最も広く使われている主観的作業負荷尺度の一つであり、知的・知覚的要求 (mental demand: MD), 身体的要求 (physical demand: PD), タイムプレッシャ (temporal demand: TD), 作業成績 ((own)performance: OP), 努力 (effort: EF), フラストレーション (frustration: FR) の6つの尺度から精神的負荷を評価する手法である。被験者は日常的に PC を利用する 21 歳~25 歳の男性 5 人で、平均年齢は 22 歳である。

5.2 実験結果と考察

各被験者のタイピング以外に要した各手法の操作時間を表 1, NASA-TLX 点数を表 2 に示す。タイピング以外に要した時間とは、マウス操作や提案手法のジェスチャ操作に要した時間、つまり資料閲覧のためサブディスプレイのウィンドウを切り替える時間やスクロールする時間である。

5.2.1 操作時間の比較

マウス操作の操作時間の平均は 39.8 秒であった。提案手法では 30.8 秒であり、マウス操作と約 22% の差があった。t 検定の両側検定を行ったところ $p=0.04$ であり、有意差はあると判断できる。この結果から、提案手法は非アクティブウィンドウを操作するためにキーボードから手を離す時間を節約できたと考えられる。また、提案手法の操作時間には誤操作や誤認識による無駄な時間が含まれているが、認識率を向上させることでさらに操作時間を減少でき

ると思われる。

5.2.2 精神的負荷の比較

マウス操作の NASA-TLX 点数の平均は 48 であった。提案手法では 32.2 であり、マウス操作と 15.8 の差があった。t 検定の両側検定を行ったところ $p=0.03$ であり、有意差があると判断できる。この結果から、提案手法の精神的負荷はマウス操作より低く、被験者は提案手法を楽に感じたと思われる。各被験者の尺度ごとの点数と重みを表 3, 4 に示す。各項目の点数が高いほど精神的負荷が大きいという意味であり、重みが高いほどその項目が精神的負荷にとって重要な項目という意味である。

知的・知覚的要求

知的・知覚的要求の点数については 4 人の被験者は点数の差が少なかったが、2 人の被験者は提案手法の方が低かった。これはマウス操作をする場合はウィンドウをタスクバーから探さないといけませんが、提案手法では指の動きによって開かれるウィンドウが決まってい覚える必要がなかったことが原因だと考えられる。

身体的要求

身体的要求については 3 人は提案手法の点数が低く現れたが、1 人は提案手法の負荷を高く評価した。これはキーボードのホームポジションから手を離さなくてもいいことを楽に感じた人と、認識のためにタイピング中に指を高く上げないといけないことを不便と感じた人両方がいると考えられる。観察結果自然に指を上げる人がいる一方、上げた指は震えている人もおり、タイピング中に指を一本だけ上げることの負担は人によって違感じられるのが原因だと思われる。今後人が指を動かせる範囲について調べ、負担の少ないジェスチャの設計に反映する必要がある。

タイムプレッシャ

タイムプレッシャについては被験者 B 以外は提案手法で点数が低く現れた。これは操作時間の比較の結果から、提案手法の操作時間が短いことがタイムプレッシャが低くなった原因だと考えられる。

作業成績

作業成績については、3 人はマウス操作の負荷を高く評価し、3 人は提案手法の負荷を高く評価し、両手法を比較して一貫した傾向が見られなかった。これは観察結果から人によってハンドジェスチャの認識率に違いがあり、ジェスチャ操作をうまく使いこなせた人と認識率が悪く使いこなせなかった人の差が現れたと考えられる。被験者 3 人の作業成績の重みが最大である 5 となったことから、このシステムにおいて作業成績は重要な項目であり、認識率を向上させることでさらに精神的負荷を減らせると考えられる。

努力

努力については、3 人はマウス操作の負荷を高く評価し、3 人は提案手法の負荷を高く評価し、両手法を比較して一貫した傾向が見られなかった。この結果から提案手法に慣

表 3 NASA-TLX 尺度ごとの点数

	A		B		C		D		E		F	
	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法
MD	30	30	15	20	50	20	15	10	35	20	70	70
PD	60	10	20	10	20	15	60	15	20	50	85	20
TD	35	25	35	45	45	35	30	15	75	25	80	50
OP	40	75	20	10	20	55	40	20	70	60	15	30
EF	55	10	20	25	25	35	20	10	50	30	15	40
FR	50	25	35	25	25	20	70	20	40	30	55	25

表 4 NASA-TLX 尺度ごとの重み

	A		B		C		D		E		F	
	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法	マウス	提案手法
MD	2	0	3	4	4	1	3	3	1	2	4	4
PD	5	5	1	1	1	1	5	2	0	0	5	0
TD	0	3	4	5	5	3	2	0	4	3	2	3
OP	1	3	2	2	1	5	1	5	3	5	3	4
EF	4	3	0	1	1	4	0	1	5	3	0	3
FR	3	1	5	2	3	1	4	4	2	2	1	1

れるための要求時間は人によって違うと考えられる。今後、提案手法を習熟するまでの長期的な実験も必要であると考えられる。

フラストレーション

フラストレーションについては、全被験者から提案手法の点数が低く現れた。この結果から、提案手法は安定してフラストレーションなく操作できるものであると考えられる。

6. まとめ

本研究では、深度センサによるハンドジェスチャ認識を用いて、キーボード上におけるユーザのハンドジェスチャをウィンドウ操作命令として利用するシステムを提案した。提案手法はキーボード上の深度の変化を常時取得することでジェスチャ認識を行い、ハンドジェスチャによる非アクティブウィンドウの操作ができる。提案手法を実装し、タイピング操作とポインティング操作の頻繁な切替えが求められる状況において、マウスおよび提案手法を用いた場合の操作時間と精神的負荷について比較するための実験を行った。その結果、操作時間が約 22% 減少し精神的負荷を示す NASA-TLX 点数が 15.8 低くなり、有意水準 5% の分散分析を行った結果有意差があった。

今後の課題として、ジェスチャの認識率を評価し、誤認識率の低いジェスチャを探ることでジェスチャの操作性を向上させる予定である。また、ユーザのコンピュータ操作記録を取得し、タイピング操作中に求められる機能を検討し、実装する予定である。実装後、被験者の数を増やし、再度マウス操作と提案手法の精神的負荷の評価実験を行い、有意性を検定する予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 浅田裕史, 西原 功, 中野慎夫: 画像処理によるハンドジェスチャー入力における動作判定についての研究, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 34, No. 18, pp. 55-58 (May 2010).
- [2] C. Harrison, H. Benko, and A. D. Wilson: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '11)*, pp. 441-450 (Oct. 2011).
- [3] 石田安明, 高橋裕樹: 回転操作のためのハンドジェスチャーインタフェース, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, No. 17, pp. 151-152 (Mar. 2013).
- [4] 佐藤公則, 中島章博, 鹿嶋雅之, 渡邊 睦: 手の形状を利用した非接触セキュリティキー入力システム, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 109, No. 470, pp. 19-24 (Mar. 2010).
- [5] 平川幹和子, 松尾英明, 高田雄二, 手嶋光隆: シルエット画像を用いた手形状認識, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 95, No. 583, pp. 123-130 (Mar. 1996).
- [6] 山田 寛, 島田伸敬, 白井良明: 画像処理による手話認識のための手形状識別, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p. 331 (Mar. 2009).
- [7] Kinect, <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [8] DepthSense325, <http://www.softkinetic.com/Store/tabid/579/ProductID/6/language/en-US/Default.aspx>.
- [9] 塚田浩二, 安村通晃: Ubi-Finger: モバイル指向ジェスチャー入力デバイスの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675-3684 (Dec. 2002).
- [10] 土屋太二, 高橋和彦: ハンドジェスチャによる拡張現実感システムの構築, 同志社大学理工学研究報告, Vol. 50, No. 3, pp. 107-113 (Oct. 2009).
- [11] 蔵田武志, 興梠正克, 加藤丈和, 大隈隆史, 坂上勝彦: ハンドマウスとその応用: 色情報と輪郭情報に基づく手の検出と追跡, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 25, No. 85, pp. 47-52 (Dec. 2001).
- [12] 上田悦子, 松本吉央, 今井正和, 小笠原司: 多視点シルエット画像を用いた手の形状推定, 情報処理学会研究報告, Vol. 2001, No. 66, pp. 25-31 (July 2001).
- [13] Leap Motion, <https://www.leapmotion.com/>.
- [14] 加藤 直樹, 小國 健: ぱらぱらウィンドウ: ウィンドウの切り替えを容易にするインタフェース, インタラクシオン

- 2003 論文集, pp. 123–130 (Feb. 2003).
- [15] 山中祥太, 宮下芳明: スイッチバックカーソル: 重なりあったウィンドウ間を移動可能なマウ斯卡ーソル操作手法, 第 19 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2011) 論文集, pp. 66–71 (Dec. 2011).
 - [16] J. Rekimoto: ThumbSense: automatic input mode sensing for touchpad-based interactions, *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '03)*, pp. 852–853 (Apr. 2003).
 - [17] iisu Middleware, <http://www.softkinetic.com/products/iisumiddleware.aspx>.
 - [18] Intel Perceptual Computing SDK 2013, <http://software.intel.com/en-us/vcsource/tools/perceptual-computing-sdk>.
 - [19] OpenCV, <http://opencv.org/>.
 - [20] 芳賀 繁, 水上直樹: 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定: 各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度, *人間工学*, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79 (Apr. 1996).