掌情報解析による光学式統合入力インタフェース：キャラクタ入力モードのユーザビリティの拡張

芹澤 隆史† 岩間 芳宏‡ 柳田 康幸‡

現行のタッチパッドはポインティングや文字入力など多様な機能を有する一方で，触角手掛かりが無いためブラインドタッチ等の高度な入力は困難である．一方でマウスやキーボード等の専用デバイスは持ち替えが煩雑である．我々は光拡散の特性や指先の血流変化から掌や指の位置や姿勢，デバイスに掛かる圧力などのパラメータをカメラで計測し，マウスやキーボード等の入力にマッピングするシステムにより，多機能と良好な操作性の両立を目指している．本研究では，掌に追従するホームポジションや指先の高さ情報を用いて「キーに触れる」→「キーを押し込む」→「入力」を擬似的に再現するインタフェースを実現し，キャラクタ入力モードのユーザビリティの向上を図る．なお，実際に提案システムを用いてパフォーマンスを計測した結果，ポインティングモード・キャラクタモードの切り替えに時間は平均 0.4 秒，キャラクタ入力速度は平均 1.6 回/秒であった．

Input interface using optical palm-performance analysis for integrated manipulation: Usability enhancements for character input

TAKAFUMI SERIZAWA† YOSHIHIRO IWAMA‡ YASUYUKI YANAGIDA‡

A touchpad enables various input functions, including pointing and character input. However, it is difficult to touch-type using a touchpad because it does not provide a haptic cue. On the other hand, manipulation using dedicated devices such as keyboards and mice requires the switching motion between these devices. We have proposed an input device that does not require switching motion during the manipulation. By capturing the image of an entire hand placed on a semi-transparent hemi-spherical surface, our device can acquire positions and orientations of hand parts, as well as shear force and normal force at each fingertip. These parameters are then mapped to pointing, character input, or a 3-dimensional vector. In this study, we improved the image processing for character input by making use of the palm position as the home position and the amount of gap between the device surface and fingertip. With this method, we could take advantage of the position information before the fingertip contacts the device surface. Using our prototype, the average time for switching between different input modes was 0.4 second, which was much smaller than the time required for switching between physical devices (0.7 second).

1. はじめに

現在の一般的なコンピュータへの入力手法は，キーボードとマウスである．キーボードは各キーに 1 つのキャラクタが割り当てられており，キーを押す事でそれらを入力可能なキャラクタ入力に特化したデバイスである．また，マウスは平面における移動量の検出と少量のボタンを持つ GUI 操作に特化したデバイスである．しかし，キーボードは両手で扱う為，キーボード使用時にポインティング動作が必要となった場合，キーボードからマウスにデバイスを持ち替える必要があり煩わしさを感じることがある．

そこで我々は，キーボード（キャラクタ）・マウス（2D ポインティング）・各種 3D 入力デバイス（３D ポインティング・圧力）からの入力をシームレスに行うための光学式手指情報認識インタフェースの開発を行っている．本インタフェースは曇りガラスのドームの内側に設置されたカメラからの画像を処理することで各手指パーツのパラメータ（デバイス上での位置・姿勢(6 軸)・デバイスに掛かる圧力(1 軸)・せん断力(2 軸)）の計測を行い，結果を仮想キーボード，仮想マウス，仮想 3D 入力デバイス等の入力にマッピングすることでシームレスなインプットを実現するシステムである[1]．本研究では掌に追従するホームポジションや指先の高さ情報を用いてキーボードの「キーに触れる」→「キーを押し込む」→「入力」という段階的な入力を擬似的に再現するインタフェースを実現し，キャラクタ入力モードの更なるユーザビリティの向上を目指す．

† 名城大学大学院情報工学専攻
Graduate School of Science and Engineering, Meijo University
‡ 名城大学情報工学科
Faculty of Science and Engineering, Meijo University

2. 持ち替えによる損失と従来研究

筆者が所属する研究室のメンバーのデバイス持ち替えによる時間的損失を計測したところ，キーボードからマウスへの持ち替えが平均 0.7 秒(移動 0.5 秒，指先の位置調整 0.2 秒)，マウスからキーボードへの持ち替えが平均 1.1 秒(移動 0.5 秒，指先の位置調整 0.6 秒)であった．

持ち替えの手間を省くデバイスの例として，ポインティングデバイス付きキーボードや，キーボード付きマウス等の単一のデバイス上に複数のインタフェースを同居させるものが存在する．ポインティングデバイス付きキーボードは，キーボードに置かれた手の親指付近にポインティングスティックやトラックボール，あるいはタッチパッドが配置されたデバイスである．これはノート PC で一般的に用いられており，ポインティングデバイスとキーボードの持ち替えが不要で小型化も容易であるが，マウスのように広い領域で操作可能かつ，一定の重量と安定性を持ったポインティングデバイスの精度には及ばない．また，キーボード付きマウスはマウス上にキーが配置されたものであり，こちらもデバイスの持ち替えが不要であるが，マウス上にキーボードを配置するにはマウスを大きくするかキーを小さくする必要があるため，ポインティング性能とキー入力性能のトレードオフが存在する．

他のアプローチとして，指先の位置や力の掛け具合等の「手」の動作を認識し，マウスやキーボードの個別の入力にマッピングする手法が考えられる．手指動作の取得手法には，タッチパッド，舘らの GelForce[2]，データグローブ，長谷川らの SPIDAR[3]，川崎らの HIRO[4]，手指のモーショントラッカー等が存在する．

昨今のタッチパッドは，非常に安定した入力が可能になっており，多点入力や簡単なジェスチャー操作まで可能になっている．また，GelForce は多点でせん断力を含む接触状態を検出可能である．一方でこれらのデバイスには凹凸手がかりが無く，キーの位置を触覚で判別することができないため，ブラインドタッチが困難であり，キャラクタ入力の効率は従来のキーボードと比較すると低下する．

長谷川らの両手多指操作デバイス SPIDAR-8，川崎らの対向型多指触覚インタフェース(HIRO)，データグローブ等の装着型デバイスは各指の情報を個別に取得するため，キーの位置をユーザの手の動作に合わせて調整する事が可能である．このためキーの位置確認が不要となり高速なキャラクタ入力が可能となるが，一方で装着の手間などの課題も存在する．また，マーカー等を装着せず，カメラのみで指先の動作を認識する手法も存在するが，オクルージョンや環境の変化に対する耐性，精度の問題からキーボード程のキャラクタ入力速度を実現する事は困難である．

このように，持ち替えの手間を省くデバイスの実現には，手指のパラメータを個別に計測可能でセンサやマーカー等の装着が不要なデバイスと，デバイスから得られた手指のパラメータをマウスやキーボード等のインタフェースにマッピングするシステムが必要である．

3. システム構成

我々は，半透明物体を通して物体を観察した場合，距離が離れるに従いコントラストが変化する事，ライトで物体を照らした際，明るさの変化は距離の二乗に反比例する事，手指をガラスに押し付けた際血流の変化によって皮膚の色が変化する事を利用し，デバイス付近の手指の位置・姿勢情報やデバイスに掛かる圧力を計測する．また得られた手指のパラメータをマウスやキーボードの入力イベントへマッピングするインタフェースを実装した．

3.1 ハードウェア構成

操作は掌をデバイスに向けて行うため，デバイスの内側から手指を観察した場合のシルエットは大きく変化する事が少なく，画像処理による認識が容易である．また，日常的に使用するハードウェアの形状としては，キーボードやマウスのように楽な姿勢で把持可能な形状であることが求められるため，半球型のドームの内側にカメラを設置する方式を採用した．

外殻に関しては，強度と距離によるコントラスト差の確保する必要がある．表層の凹凸加工では手油の付着による劣化が起こったため，強度確保の為の厚い透明ドームと，光拡散の為の薄い乳白色ドームの二重構造を採用する事で性能とメンテナンス性の両立を図る．ドームの光拡散の度合いに関しては，外殻から 10cm 程度の距離で各指の姿勢判別が不可能になり，50cm 程度で手の肌色が背景と同化する程度のものを採用した．また，カメラは 60FPS で動作するもの，光源は PIC 制御によりカメラのシャッタータイミングと同期して 1/60 秒毎に点滅を繰り返すものを採用した．（図１）

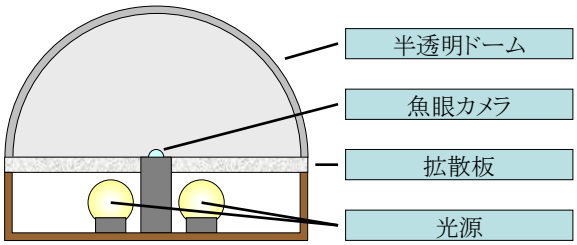

図1　デバイスの構成

3.2　指先識別・圧力検出アルゴリズム

以下に本インタフェースが手指画像から各パラメータを抽出する処理手法について説明する．

最初の処理として，肌色領域の抽出を行う．魚眼レンズカメラから取得したバックライトの点灯時（図２左上）と消灯時（図２右上）のカラー画像の差分を計算し，背景画像の領域を除去する（図２左下）．次に，画像上の手領域の分布を認識する為，画素の色が肌色～黄色に近いほど高い値が設定される手尤度画像をRGB 画像から計算する．（図２右下）

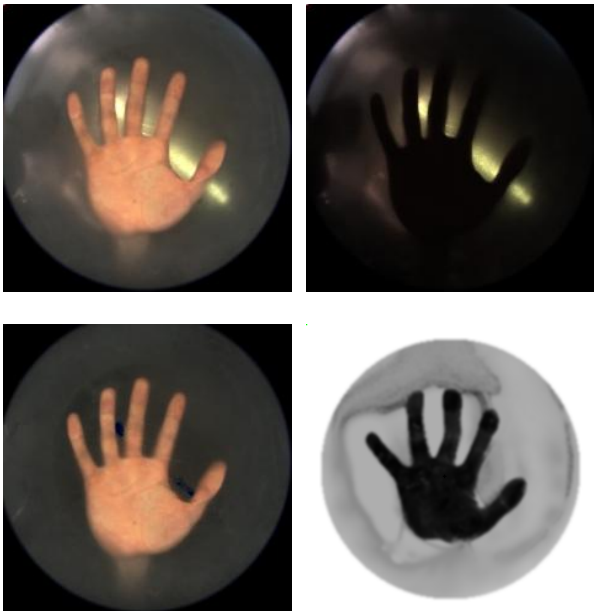

図2　肌色領域の抽出

魚眼レンズにより取得された画像は部分毎に曲率や歪みが大きく異なるため，掌を中心に補正を行う必要がある．今回は手尤度画像の重心を検出した後（図３左），遺伝的アルゴリズムを用いて掌の重心を検出した（図３右）．

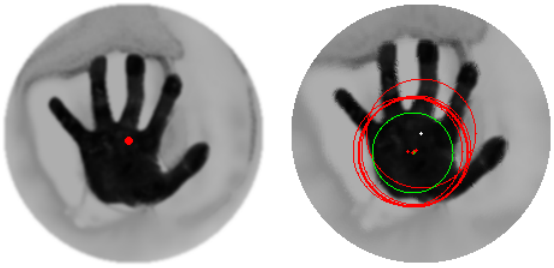

図3　掌重心の抽出

人差し指から小指の検出を行うため，掌の中心から同心円状に尤度画像を探索し，尤度の高い部分を放射線方向に接続し指候補とする（図４左）．次に一定以上の長さを持つ指候補のベクトルと掌の内接円の交点を求め，４本の指候補が 90 度以内に存在する範囲を見つけることにより人差し指・中指・薬指・小指の候補を決定する（図４右）．

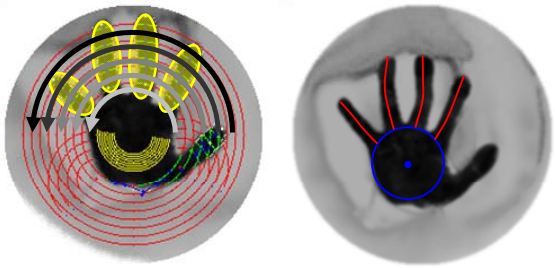

図4　人差し指から小指の検出

人差し指と小指の基点から親指の付け根の候補点を推定し（図５左上），人差し指～小指の推定と同様な手法で親指を検出する（図５右上）．また，親指の検出により右手と左手の判別が可能となる（図５下）．

図5　親指の検出

指の中心線・母指球・小指球周辺を探索し，手指の稜線（尤度が急激に落ち込む場所）を検出する（図６）．また，指の関節位置の推定精度を向上させる為，稜線を基準に指の中心線の再計算を行う（図７）．

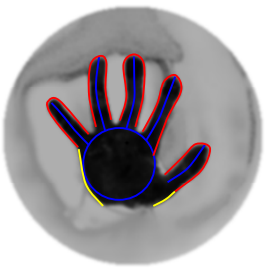

図6　手指の稜線検出

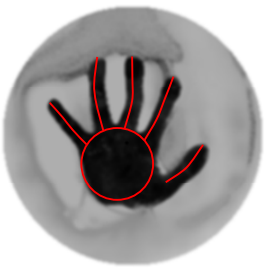

図7　指の中心線の再計算

デバイス付近と手指の距離が一定以下の場合，手指領域の色相，バックライトの点滅による明度差，彩度，稜線の明確さはデバイスとの距離や手指に掛かる圧力によって図８のように変化する．この変化から外殻と手指の距離を推定する．

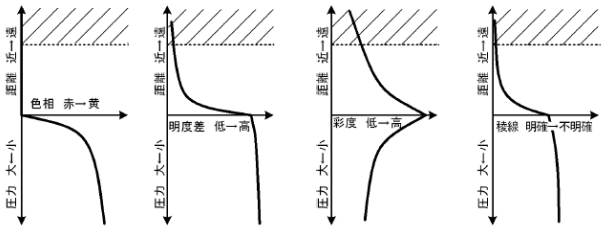

図8　距離と圧力による色変化

距離推定により，手指と外殻が接していると判断された場合，加圧による血流変化により色が変化した領域のサイズから指先に掛かる圧力を推定する．また，色が変化した領域と指先の輪郭の位置関係からせん断力を推定する（図９）．

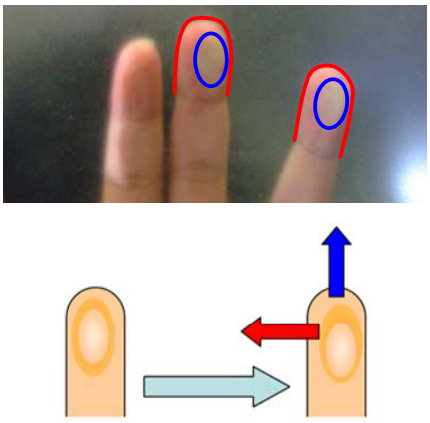

図9　圧力・せん断力の推定

光拡散物体を介して物体に光を照射する場合，物体が接触した際にバックライトの反射光が急激に強くなる現象（FTIR/Diffused Illumination）が知られている．入力のレスポンス向上のため，キー入力の瞬間の検出は指先領域の色ではなく色変化から行う．

以上の手指情報の抽出アルゴリズムにより，末節・中節・基節部分と掌の 3D 位置・3D 姿勢・圧力分布と IP・DIP・PIP・MP 関節の位置を計測する．

3.3　入力モードの判別

計測された手指の姿勢情報からデバイスの入力モード（キャラクタ入力・2D 入力・3D 入力）の判別を行う．今回は，指先をドームに接触させた状態をマウスモード，掌全体をドームに接触させた状態を 3D 入力モード，手首側がドームに接触し MP 関節付近を浮かせた状態をキーボードモードとした（図 10）．

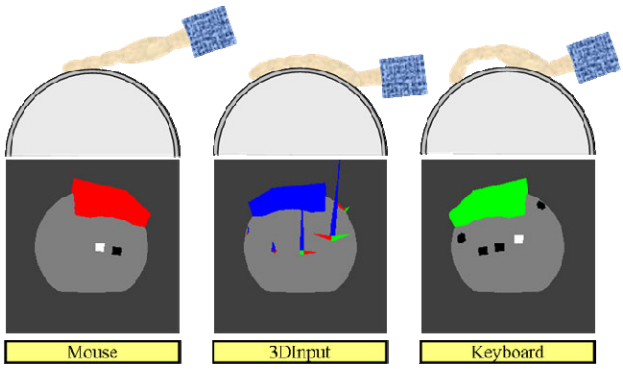

図10　入力モードの判別

4.　マウス・キーボードへのマッピング

マウスモードではポインティングと左右のクリックによる GUI 操作を行う．ポインティング機能に関しては，中指方向への手の移動を Y 軸のポインタ移動，中指に直交する方向への移動を X 軸のポインタ移動とし，掌とデバイスの距離からクラッチ動作の判別を行う事でマウスと同様のポインティング機能を実現した．また，左右のクリック機能は人差し指と中指の接触を割り当てる（図 11）．

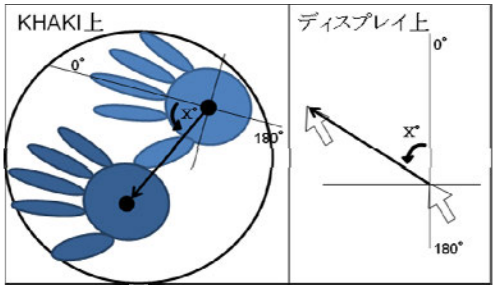

図11　ポインタの移動方向例

キャラクタモードでは文字入力を行う．2011 年 12 月現在では，稼動可能な実験機が 1 台限りであったため，指先の位置で母音を決定し，指先の押下回数で子音変化させる携帯電話の文字入力のようなキャラクタ入力インタフェースを実現した．通常のキーボードを使った文字入力との類似性を考慮し，人差指から小指までを文字入力操作に使用し，親指にスペース，エンター，デリート(押下してスライドするモーションにより動作)を割り当てる（図 12）．

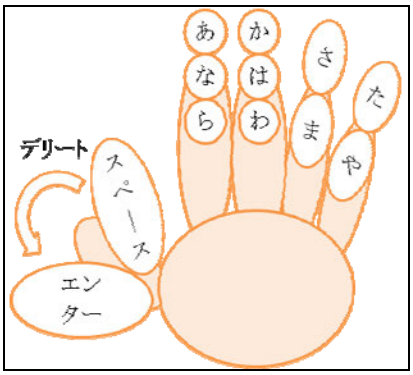

図12　キーの配置

また，各指の先端座標を取得し，現在の指の位置がそれぞれどのキーを押す位置に対応しているかを人差し指から順にディスプレイに予測表示を行うようにした（図 13）．

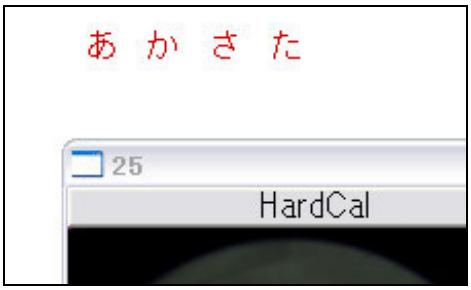

図13　入力できるキーの表示

5.　キャラクタ入力モードの拡張

通常のキーボードはキー自体の触覚手掛かりにより，「キーに触れる」→「キーを押し込む」→「入力」という段階的な入力があり，ユーザの記憶にあるキー配置と指先の移動感覚から入力の前に触れているキーが正しいかどうかを判断可能であるため，誤入力の少ないブラインドタッチが可能である．一方で，現行のタッチパッド/タッチパネルは指先が接触した瞬間に入力が行われる為，誤入力が頻発する．

提案デバイスでは，各指の高度と降下速度から次に入力される可能性の高いキーを識別し，入力の前から半透明の文字を表示する事でキーボードのような段階的な入力を擬似的に再現する（図 14）．

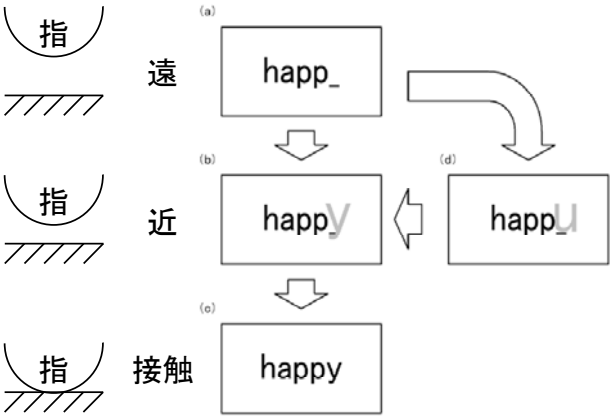

図14　段階的な入力の再現

一般的なタッチパッド/タッチパネルは凹凸が無くキーがデバイスの絶対位置を基準に配置されている為，ホームポジションへの手の移動や指先の位置調整には目視による確認が必要である．提案デバイスは接触・非接触に関わらず掌の位置や角度の認識が可能なため，掌を基準としてキーを移動させることが可能となり，デバイス上の絶対位置の押下ではなく，指先の相対移動によって入力するキャラクタを変化させる事が可能となる．また，提案デバイスは指を個別に識別するため，デバイス上のキーの干渉が無くなり，ユーザの手にフィットしたコンパクトなキー配置が可能となる（図 15）．

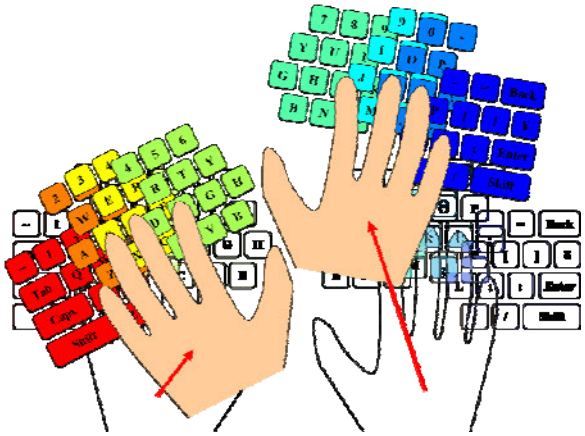

図15　手に追従するキー配置

6.　動作の様子

提案デバイスの外観（図 16）及び，キャラクタ入力モード（図 17 上段）・2D 入力モード（図 17 中段）・3 D 入力モード（図 17 下段）時の入力画像（図 17 左）と出力（図 17 右）を示す．

図16 提案デバイスの外観

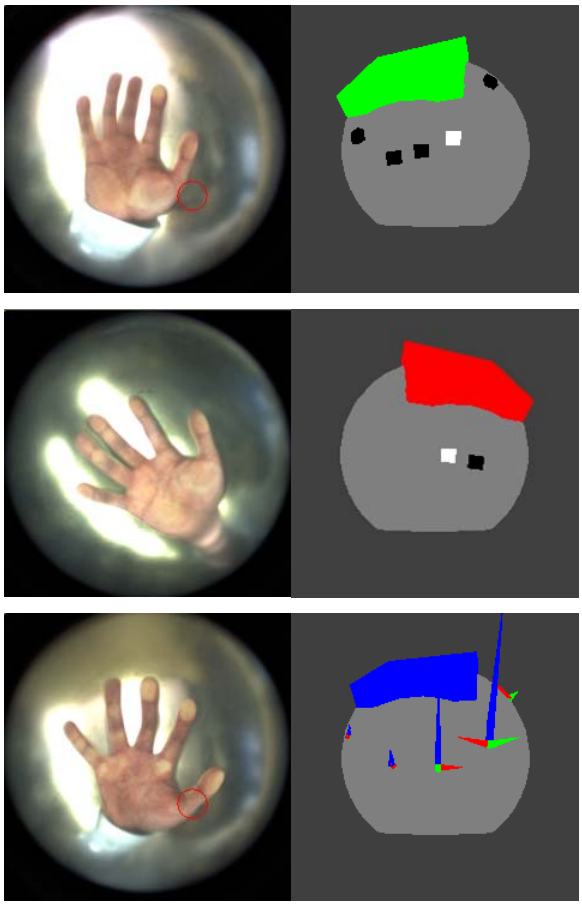

図17 動作の様子

（CPU:C2D E8500 RAM:2G IEEE カメラ Point Grey Flea2 で計測）240*240pix の画像を使用した場合，処理時間は平均 16ms+カメラからの入力遅延であった．

直上に蛍光灯・デバイスから 40cm の距離にデスクトップモニタを配置した状態で入力時のパフォーマンスを計測したところ，マウス・キーボードのモード切り替えに要する時間はキーボードからマウス・マウスからキーボード共に 0.4 秒で往復 0.8 秒，キーボードモードで平均キー入力回数は 1.6 回/秒であった．

7. まとめ

本研究では掌情報解析による光学式統合入力インタフェースのキャラクタ入力のユーザビリティを向上させることを目的としたユーザインタフェースの開発を行った．

試作機を用いて入力パフォーマンスを計測したところ，マウス・キーボードのモード切り替えに要する時間はキーボードからマウス・マウスからキーボード共に 0.4 秒であり，平均的な PC ユーザのキーボードとマウスへの持ち替え（キーボード→マウス：0.7 秒，マウス→キーボード：1.1 秒）の平均時間 0.9 秒と比較して 0.5 秒の短縮が可能となった．一方で，現時点での提案デバイスによるキャラクタ入力時の打鍵速度は 1.6 回/秒であり，筆者が所属する研究室メンバーの平均的なキーボードの打鍵速度 2.5 回/秒と比較すると十分とはいえない．この原因は，手指の血色や環境光の変化により入力精度が変動する事が原因の一つである．今後は手指の血色や環境光のパラメータを順次更新する事で環境変化に対する耐性の向上を目指す．

謝辞 本研究の一部は公益財団法人堀科学芸術振興財団の助成を受け行った．

参 考 文 献

1) 大島工,手全体を用いたシームレスな位置・方向・力の入力手法に関する研究，第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，1B3-3 2009.
2) Kazuto Kamiyama, Kevin Vlack, Terukazu Mizota, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi, “Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields”, IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Vol.25, No.1, pp.68-7, 2005.
3) Katsuhito Akahane, Xiangning Liu, Masaharu Isshiki, Naoki Hashimoto, Makoto Sato: An Image Haptization System via SPIDAR-SPIDAR-G-A Haptic interface that enables users to touch 2D images, ASIAGRAPH2008, Vol.2, No.1, pp.341, 2008 6
4) H. Kawasaki, J. Takai, Y. Tanaka, C. Mrad, and T. Mouri, Control of Multi-Fingered Haptic Interface Opposite to Human Hand, Proc. Of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), Las Vegas, pp. 2707-2712, 2003