

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究（C）一般

研究期間：2009～2011

課題番号：21500124

研究課題名（和文）三次元空間筆記インタフェースのための手書き文字認識・文字評価の研究

研究課題名（英文）Research of Handwritten Character Recognition and Evaluation for Aerial Handwriting Interface

研究代表者

中井 満（NAKAI MITSURU）

富山県立大学・工学部講師

研究者番号：60283149

研究成果の概要（和文）：

空中に文字を書く動作の信号から何の文字を書いたかを認識する技術の開発を行った。誰でも、どこでも、どのような書き方でも認識できることを目標として、筆記者・筆記場所・筆記の姿勢・筆記具の持ち方等の変動への対策を考案し、認識性能を改善した。また、文字評価ではペンで書かれた文字に対して、正しい筆順で書かれているか、きれいに書かれているかを確率的に評価する手法を検討した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we proposed an aerial handwriting interface using 3-dimensional acceleration sensors and developed a method for recognizing characters written in the air. In order to utilize the system in real environments, handwriting recognition tests were carried out in various situations, such as writer independent model, writing surface-free and pen holding style-free. Also, we investigated stroke-order search method and character shape evaluation method for handwriting-based character learning system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：ヒューマンインタフェース、パターン認識

1. 研究開始当初の背景

三つの状況から本研究を構想するに至った。一つは情報端末の小型化に伴う文字入力手段の問題である。携帯電話のようにキーの数が少なくなると新たな入力方式を習熟する必要があり、ユーザにとっては負担である。二つ目は離れた位置からジェスチャー操作

可能な、いわゆる 10 feet ユーザインタフェースの普及である。テレビ付きパソコンの空間マウスや、モーションで操作するゲーム・コントローラが普及しているが、文字の入力は五十音の表をカーソルで指すという単純な方式である。三つ目はパソコンを用いた学習機会の拡大である。腕を振って字を覚える「空書き学習」のような用途であれば、安価

なセンサを腕に取り付け、一つのサーバに同時接続する形態が可能である。これらの状況の共通の文字入力方式として、どのような場所でも書ける「三次元空間筆記（空中筆記）」と、誰でも書ける「手書き文字認識」に着目した。

空中筆記は先進的な入力インタフェースであるが、これまでも様々な手法が試みられている。例えば、(a)位置・加速度センサ、(b)赤外線カメラなどを利用した手法が既に提案されている。当時の研究の主な目的は空間上の筆跡を可視化して情報共有することであり、これらはヘッドマウントディスプレイで、空間上の筆跡を目で見るシステムである。これに対し、本課題の目的は、文字を書こうとするユーザの意思を手・指の動きから読み取って、文字を認識することが主であり、丁寧に書く必要はない。また、手に持った筆記具以外の外部センサやカメラを用いないので、屋外など、どのような場所でも文字を書ける可搬性の高い入力インタフェースである。

2. 研究の目的

本課題では手や指を振って三次元的に空中に書かれた見えない文字パターンが、「何の文字であるか」をコンピュータで認識する技術と、「どのような筆順や字形で書かれたか」を評価する技術を、時系列パターンの認識手法に基づいて開発する。応用として、ウェアラブル PC の文字入力手段、さらには空間マウスを筆記具とした漢字教育支援システムを想定する。具体的には以下のことを目的とする。

- (1) 加速度センサや角速度センサを内蔵した筆記具を持ち、空中で手を振って文字を書く信号を様々な姿勢や環境で収集する。
- (2) 書き方（姿勢、持ち方、振り方）の違いから多様な変形が予想される。これらの変動に頑健な特徴抽出法を検討する。
- (3) 三次元空間での手の動き信号から、文字区間を自動で切り出し、一筆書きの文字を認識する手法を確立する。
- (4) 文字がどのような筆順で書かれたかを探索する手法、およびきれいに書かれたかを評価する手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 空中手書き文字データの収集・整備

このような文字データベースは皆無なので、新たに収集する。具体的には加速度センサと角速度センサを内蔵した筆記具を手または腕に装着し、空中で文字を書く動作の信号を 10 ミリ秒間隔でサンプリングする。文字は一文字ずつ収集することとし、筆記する

文字はランダムに提示する。なお、自然な書き方となるように、ボタン操作を挟まない。

(2) 空中手書き文字の特徴抽出

従来の手書き文字認識ではペンの座標情報から特徴量を抽出するものが主であるが、本研究では座標情報は得られないので、加速度信号を特徴量に使用する。また、角速度センサで姿勢の変化を測定し、書き方や持ち方の変動を補正することを試みる。

(3) 空中筆記文字の変形要因・個人性の分析

手本となる書き方はなく、筆跡も見えないので、筆記者の個人性が認識の上での大きな課題となる。筆記の勢いや文字の大きさなどの個人性を分析し、正規化する手法を検討する。

(4) 空中手書き文字の認識評価

筆跡の時系列パターンの認識に適した隠れマルコフモデル (HMM) 方式を用いる。空中で書かれた一筆書き文字を認識するため、文字の字画の HMM、画間の移動に相当する HMM、文字の始端・終端を表わす HMM を学習し、これらを連結して一筆書きモデルを表す。ベイズ識別によって文字を認識する。

(5) 手書き文字の筆順評価・字形評価

筆跡の再現の自動化は今後の課題とし、再現された筆跡から筆順および字形の評価を行う。筆順の探索には文字の構造を利用したネットワーク探索を、字形の評価には崩れた箇所を推論するベイジアンネットワークを使用する。

(6) 実環境システムの試作と評価

モバイル PC と空間筆記具を接続し、室内外の日常的な動作を伴う環境での空中手書き文字認識性能の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 空中手書き文字認識システム

3 軸の加速度センサを内蔵した筆記具を持ち、空中に文字を書く動作の信号から文字を認識するシステムを構築した。筆記具には加速度センサ (ANALOG DEVICES Inc. ADXL330) を内蔵する Nintendo Wii のリモコンを用いる。図 1 は筆記のイメージであり、筆記具をペンのように持って、あるいはリモコンのように握って文字を書く。自然な筆記となるようにボタン操作を入れずに書くと、図 1 の「あ」の筆跡のような一筆書きとなる。この信号を無線 (Bluetooth) でパソコンに送信し、文字認識する。図 2 は「あ」を筆記した 3 軸の加速度信号を 10 ミリ秒間隔でサンプリングした波形であり、X 軸 (赤色) は筆記面の左

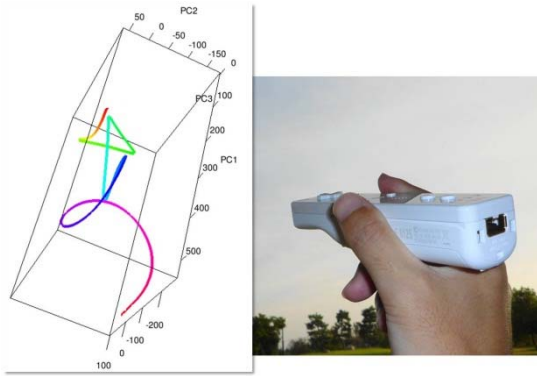


図 1：空中手書き

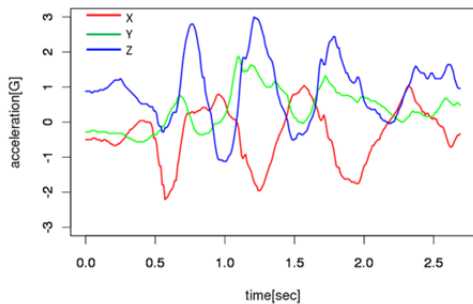


図 2：文字「あ」の 3 軸加速度信号

右方向、Y 軸（緑色）はペン先方向、Z 軸（青色）は筆記面の上下方向である。Z 軸の波形には重力加速度が加わっている。図 3 は認識システムの概略である。まず、筆記した信号のパワーの変化から一文字を筆記した区間を検出する。次に筆記具の持ち方によって生じるセンサ座標系と実空間の座標系の傾きを回転補正する。その後、正規化処理によって得られた加速度信号を認識の特徴量とする。システムの学習では、文字の画を書く信号、画と画を続け書きする信号、文字を書く前後の信号をそれぞれ隠れマルコフモデル (HMM) でモデル化し、これらを連結して様々な文字モデルを生成する。認識では、書かれた文字の信号を出力する確率を最大にする文字モデルを選択し、認識結果とする。

評価実験では 1 名の筆記者から、平仮名 71 字種、各字種 80 文字を数日に渡って計 5,680 文字の空中手書き文字を収集した。学習筆記者と認識筆記者が同一となる特定筆記者の実験では、ひらがな 71 字種に対し、システムの学習直後の使用で 97.5% の文字認識率を得た。また、学習から数日経て使用する場合は筆記具の持ち方の変化により認識率が低下する。そこで、文字を壁向きに書くという制約の下、重力加速度を基準とした座標系の回転補正を施して、89.6% の認識率を達成した。

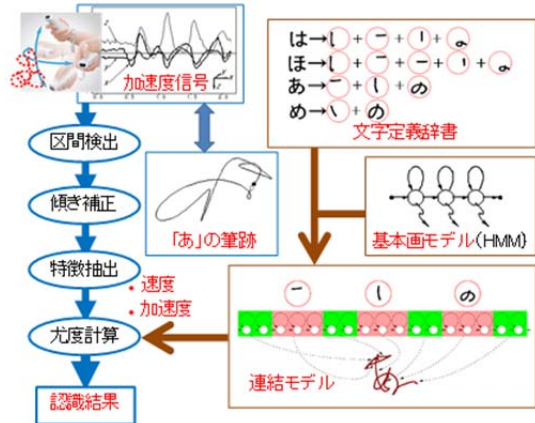


図 3：空中手書き文字認識システム

(2) 不特定筆記者のための正規化手法の検討
文字を書く勢いや大きさは人によって異なり、筆跡が見えない空中筆記では、より顕著に違いが現れると予想する。そこで、書く勢いには一文字あたりの加速度の大きさを求め、文字の大きさには再現した筆跡の外接矩形面積を求め、これらを個人性とする。なお、筆跡を自動で再現するため、文字の始点と終点を原点に仮定した。筆記の信号からこれらの個人性を除去するため、一文字筆記する毎に加速度の大きさの平均、あるいは外接矩形面積を正規化する。

評価実験ではひらがな 71 字種について、合計 4 名から収集した 4,615 文字を使用した。システムの学習には 3 名を用い、残りの 1 名を認識評価に用い、交差確認を行った。特徴量の正規化を行わない場合に 62.0% であった認識率が、文字の大きさを正規化した場合に 70.4%、書く勢いを正規化した場合に 75.2% にまで向上した。しかし、特定筆記者の認識率に比べると低く、筆跡の癖やペンの持ち方など、別の要因も検討する必要がある。

(3) 筆記方向や筆記具の持ち方が自由な認識
これまでは文字の下方向が重力方向となるように壁向きに書くという制約を設けていた。そこで、自由な向き（天井向き、床向きなど）に自由なペンの持ち方（センサの向きに依存しない）で書くことができる空中手書き文字認識手法を開発した。

空中でも文字は平面に書かれると考えられる。図 4 は文字「あ」を壁向きに筆記したときの加速度信号の軌跡を 2 軸の平面に投影したものである。X、Y、Z 軸はそれぞれ水平、奥行、垂直方向なので、壁面にあたる XZ 面に信号が広く分布する。しかし、横 (YZ 面) から見たとき、信号の広がり傾きがあることから分かるように、必ずしも意識した面に書けているとは限らない。そこで、分散が最大と考えられる筆記面を主成分分析で推定

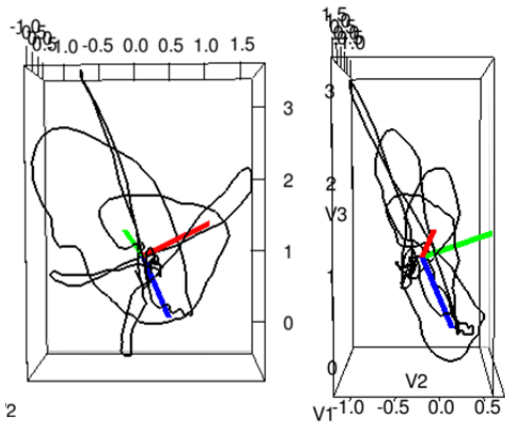


図 4: 加速度の三次元軌跡と主成分軸

し、KL 展開で加速度信号をその平面に投影する。図 4 の中央の軸は青色が第 1 主軸、赤色が第 2 主軸、緑色が第 3 主軸である。したがって、青色と赤色の軸が張る平面を筆記面と推定する。

評価実験では持ち方を固定し、筆記面を壁向き、床向き、天井向きと変えてサンプルを収集した。なお、筆記者の主観で空中に書いてもらったので、天井向きと言っても真上とは限らない。また、筆記面内での文字の向きは筆記具のセンサの XZ 座標系が上下左右になるように回転補正した。平仮名 71 字種について各一文字ずつ書くことを 1 セットとし、学習用に各 15 セットを、評価用に各 5 セットを用意した。壁向きに書かれることを想定した従来の回転補正では天井向きに筆記したサンプルに対してわずか 1.7% の認識率であったが、主成分分析で筆記面推定を行うことで 86.6% の認識率を得た。

以上は、筆記具の持ち方を固定した場合である。筆記面に KL 展開した信号は回転と反転が生じており、同じ文字種であってもサンプル毎に向きが異なる。筆記具の持ち方を自由にした場合、内蔵されたセンサの向きも変わるため、センサの座標系を基準にすることはできない。そこで、サンプル毎の加速度方向ヒストグラムを利用する。図 5 は文字「あ」を筆記したときの加速の向きを加速の大きさと重み付けしてヒストグラムにしたものである。文字を書くときに右方向と下方向、および左上方向に多く加速していることが分かる。このヒストグラムは字種毎に固有の形をしていると考えられる。そこで、サンプルのヒストグラムの相互相関が最大になる角度を求めて筆記面を回転し、文字の向きを揃える。ただし、異なる字種の向きが揃う保証はないので、隠れマルコフモデルは文字毎に独立に学習する。認識時は未知入力文字を仮定した字種のヒストグラムを基準に回転し、当該字種の隠れマルコフモデルで尤度計算を行う。実験では回転補正なしで認識率

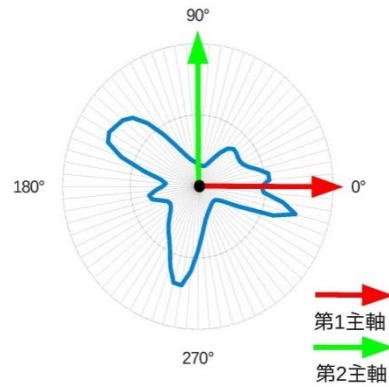


図 5: 加速度方向ヒストグラム

65.9% のサンプルに対して、回転補正を加えて 81.6% まで向上した。

(4) 空中手書き文字特徴量の検討

加速度センサを用いた空中手書き文字認識において、ひらがなでは筆記面の 2 次元特徴量の方が有効であった。しかし、数字の「0」と「6」の識別においては筆跡の位置情報が重要であり、筆記面の加速度特徴量での識別は困難と思われる。そこで、ペン先方向の加速度特徴量の利用について検討した。図 6 は「0」と「6」を筆記したときの加速度信号である。黒色の信号波形は筆記面の 2 軸であり、赤色の信号波形はペン先方向の加速度特徴量である。腕を水平に伸ばして文字を書くとき、筆記終了時のペン先方向が「0」は上向きになるのに対し、「6」は水平な姿勢となる。静止状態では、ペン先方向には重力加速度のみがかかっており、これは傾きによって変化する。このことから、ペン先方向の加速度特徴が文字の縦方向の位置座標情報の代わりになると考えられる。

そこで、筆記空間の 3 次元加速度特徴量と筆記面の 2 次元加速度特徴量の比較実験を行った。認識対象は数字 10 字種とひらがな 71 字種とした。数字・ひらがな各々に対して各字種一文字ずつ筆記したものを 1 セットとし、5 名の筆記者から 50 セットのサンプルを

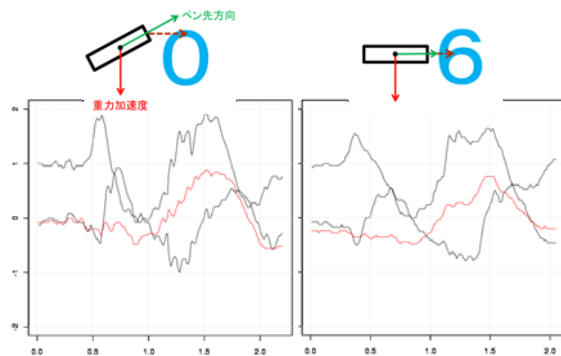


図 6: ペン先方向の加速度の違い

収集した。学習には4名のサンプルを、評価には残りの1名のサンプルを使用して交差確認した。この結果、ひらがなでは2次元特徴量の方が認識率は高く(2次元:77.9%, 3次元:77.2%)、数字では3次元特徴量の方が高い(2次元:88.8%, 3次元94.8%)という結果が得られた。

次に、筆記面の2次元加速度特徴量とペン先方向の加速度特徴量は独立であると仮定し、マルチストリームHMMを用いて、それぞれの尤度に重み付けをした。その結果、数字の場合は等重みのときに94.2%、ひらがなの場合はやや小さめの重みのときに83.8%まで認識率が改善した。よって、いずれの文字集合においてもペン先方向の加速度特徴量が有効であることが分かった。

(5) 角速度センサを利用した動的な回転補正

筆記具に内蔵した加速度センサの座標系で軌跡をとらえているため、手首のひねりなどにより、意図した筆跡とは別の筆跡としてとらえられる恐れがある。そこで、筆記具の回転を角速度センサで検出し、加速度センサの座標系から実空間の座標系に変換することで筆記具の回転を動的に補正する手法を検討した。

図7は文字「あ」を筆記したときの角速度の変化であり、図2の加速度信号と対になる。赤色はX軸まわりのPitch角速度、緑色はY軸まわりのRoll角速度、青色はZ軸まわりのYaw角速度である。左右に振るときにYaw角が、上下に振るときにPitch角が変化し、Roll角は比較的变化が小さい。この角速度信号を積分することによって、書き始めを基準とした筆記具の姿勢角を求め、加速度信号の座標系を逐次回転する。

実験はひらがな71字種を各一文字ずつ筆記したものを1セットとし、1名が筆記した。システムの学習には、腕を振って自由に書いた1,065字(15セット)を用いた。評価用には学習用と同様に自由に書いた355字(5セット)と途中で不規則に筆記具のRoll角を

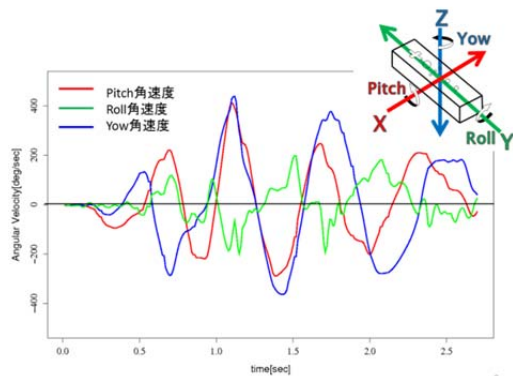


図7: 文字「あ」の3軸角加速度信号

回転させて書いた213字(3セット)を用いた。筆記中の回転(Roll角)を不規則に行った場合、Roll角を補正することで認識率が9.9%から76.5%へと大きく向上した。また、自由に筆記した場合では回転補正によって、96.6%に向上したが、補正しなくても元々91.8%の認識率であった。これは特定筆記者のサンプルのため、筆記具の回転そのものが規則的であったと考えられる。今後は不特定筆記者で検討を行う。

(6) 実環境下の空中手書き文字入力デバイス

ここまでの空中手書き文字入力は静かな室内での利用を想定していた。これを発展し、歩行中や走行中の車内など、屋外の実環境下で利用するための空中手書き入力インタフェースおよび認識手法の検討を行った。実環境下では様々な振動など、筆記以外の加速度信号が混入する。これを除去するため、図8のような二つの加速度センサからなる筆記デバイスを試作した。腕を使わずに指先で筆記するものとして、加速度センサを指先と前腕の肘付近に装着する。まず二つのセンサから得られる加速度信号の向きを合わせるため、座標系の回転補正を行う。次に指先のセンサ信号から腕のセンサ信号を減算し、それを相対加速度特徴量とする。

評価実験は走行中の車内で筆記した文字を用いて行った。データ収集は走行中の助手席に座り、ひらがな71字種を1,562文字(22セット)筆記した。車は一般道路を走行しており、発進、停止、右左折、走行中の振動など、筆記以外の加速が加わっている。また比較用に室内で994文字(14セット)収集した。室内で収集したサンプルを用いて学習し、走行中の文字を認識した場合、指先のセンサの絶対加速度特徴量では35.4%と低い認識率であったが、二つのセンサの相対加速度特徴量を用いることで、60.3%にまで向上した。しかしながら、走行時のサンプルを用いて学習した場合には絶対加速度特徴量の74.2%に対し、相対加速度特徴量が73.7%と有意な差は見られなかった。筆記の加速度信号と比べると、走行する車内の振動はあまり大きくないためである。

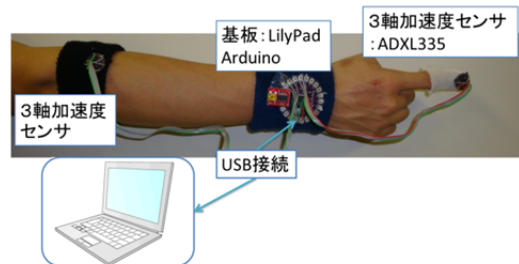


図8: 装着型筆記デバイス

文字全体	1画目	2画目	3画目	1+2画目	1+3画目	2+3画目
あ	あ	あ	あ	あ	あ	あ
あ	あ	あ	あ	あ	あ	あ
あ	あ	あ	あ	あ	あ	あ
あ	あ	あ	あ	あ	あ	あ

図 9：手書き文字の字形評価

(7) 手書き文字の字形評価・筆順評価

空中筆記した加速度信号から筆跡を再現するのは難しい課題であるので、まずはペンタブレットで収集した手書き文字を用いて、筆順および字形を評価するシステムを開発した。

字形の評価は文字がきれいに書けたか否かの二つのクラスの識別問題とする。図 9 のように文字全体・画単位・画と画の位置関係などの良し悪しを主観的にラベル付けし、客観的に得られる重心や曲率の特徴量を用いて依存関係をベイジアンネットワークで学習した。これを用いて、字形の崩れを判定し、その原因を推論する手法を考案した。

筆順の評価では考えられる画の並び替えの中から最も似ているものを探索する。また、一筆書きのように画が続けて書かれるような画数変動も考慮する。そこで偏旁冠脚などの文字構造を利用した効率のよいネットワーク探索により、筆順探索成功率を改善した。本システムは富山県立大学のダ・ヴィンチ祭などで展示し、実際に子供たちの漢字学習に利用した(図 10)。

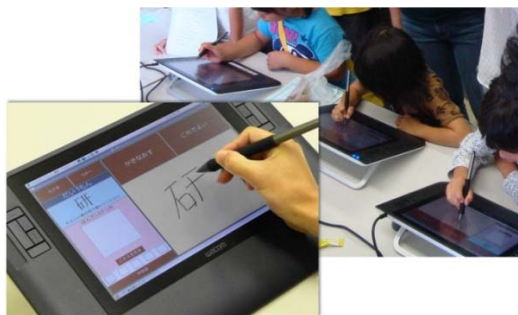


図 10：手書き文字の筆順評価

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 中井満, 米澤久光, 加速度センサを用いた空中手書き文字認識, 第 8 回情報科学技術フォーラム, 2009 年 9 月 4 日, 東北工業大学.
- ② 川辺雄司, 中井満, 不特定筆者の空中手書き文字の認識, 平成 21 年度北陸地区学生による研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 金沢工業高等専門学校.
- ③ 加藤静, 中井満, 手書き文字の崩れた個所を推論する確率的な字形評価, 平成 21 年度北陸地区学生による研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 金沢工業高等専門学校.
- ④ 中井満, 加藤静, 手書き文字の崩れを評価する確率的な字形評価, 第 9 回情報科学技術フォーラム, 2010 年 9 月 7 日, 九州大学.
- ⑤ 長井貴大, 中井満, ペンの向きに依存しない空中手書き文字認識, 平成 22 年度北陸地区学生による研究発表会, 2011 年 3 月 5 日, 富山高等専門学校.
- ⑥ 松木一穂, 中井満, 加速度・角速度センサを用いた空中手書き文字認識, 平成 22 年度北陸地区学生による研究発表会, 2011 年 3 月 5 日, 富山高等専門学校.
- ⑦ 中井満, 長井貴大, 筆記面が自由な空中手書き文字認識, 第 10 回情報科学技術フォーラム, 2011 年 9 月 7 日, 函館大学.
- ⑧ 松木一穂, 中井満, 加速度センサと角速度センサを利用した空中手書き文字認識, 第 10 回情報科学技術フォーラム, 2011 年 9 月 7 日, 函館大学.
- ⑨ 松木一穂, 中井満, 加速度・角速度情報を利用した不特定筆者の空中手書き文字認識, 平成 23 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2011 年 9 月 18 日, 福井大学.
- ⑩ 福山慎太郎, 中井満, 走行中の車内で書かれた空中手書き文字の認識, 平成 23 年度北陸地区学生による研究発表会, 2012 年 3 月 10 日, 石川工業高等専門学校.
- ⑪ 大坪由香利, 中井満, 空中手書き文字認識におけるペン先方向の加速度特徴の効果, 平成 23 年度北陸地区学生による研究発表会, 2012 年 3 月 10 日, 石川工業高等専門学校.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 満 (NAKAI MITSURU)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：60283149