

壁面を利用したピン型入出力デバイスのための 誤差の累積を考慮した位置検出手法

岸野泰恵[†] 寺田 努[†] Nicolas Villar[‡] Hans Gellersen[‡] 西尾章治郎[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科

[‡] Computing Department, Lancaster University

あらまし : 筆者らの研究グループでは、壁面をネットワークとして使い、そこにさまざまなデバイスを刺し込むことでユビキタスコンピューティングを実現する Pin&Play をこれまでに提案し、ネットワーク化された掲示板と画鋲を用いたプロトタイプシステムを実現した。さらに、アプリケーションを構築する上で重要となる刺した画鋲の位置を、掲示板の前に設置したカメラを用いて検出する手法を提案している。しかし、これまでの手法では、長期間運用すると誤差が蓄積し、正確な位置を検出できなくなるという問題があった。そこで本稿では、誤差の量を見積もることで、誤差の累積を避けて位置検出を行う手法を提案する。本研究ではさらに、提案手法の有効性を確認するために評価実験を行った。

A Position Detection Mechanism with Error Estimation for Pin-Shaped Input/Output Devices

Yasue Kishino[†], Tsutomu Terada[†], Nicolas Villar[‡], Hans Gellersen[‡], and Shojiro Nishio[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

[‡] Computing Department, Lancaster University

Abstract : We have proposed Pin&Play system, which uses the wall surface as a network infrastructure and controls inserted devices to realize ubiquitous computing, and implemented prototype systems using boards and pushpins. Moreover, we proposed a position detection mechanism for pins using a camera which is placed in front of the board since positions of pins are important to implement applications. However, the previous method has one problem that the amount of position error accumulates when posting and unsticking of pins are repeated. Thus, we proposed an error estimation method for the position detection mechanism to avoid the accumulation of position error. In this paper, we also clarify the effectively of our proposed method by performance evaluation.

1 はじめに

近年、いつでもどこでもコンピュータを利用できるユビキタスコンピューティング環境に対する注目が高まっている。ユビキタスコンピューティング環境では、あらゆる場所にさまざまなデバイスが存在し、それらが連携してユーザにサービスを提供することが想定されている。

このようにあらゆる場所にデバイスを存在させるためには、それらのデバイスへの電源供給や通信手段の確保が課題となる。これに対して、筆者らは壁を通信と電源供給の手段として利用することに着想し、Pin&Playと呼ぶ枠組みを提案した [3]。Pin&Play では、壁面をネットワークと電源の供給源とし、そこにさまざまなデバイスを刺し込むことでユビキタスコンピューティングを実現する。これまでに、電源供給可能な掲示板

(ボード) と画鋲型のデバイス (ピン) を用いたプロトタイプシステムを実装した (図 1)。

また、壁面にデバイスを設置する際には、設置された位置によって重要さや期待される動作が異なるなど、デバイスの位置が必要となる。そこでこれまでにピンの位置を検出する手法を提案した [2]。提案した手法は、ピンに付属する LED の点滅をカメラで撮影し、画像処理によってピンの位置を取得する。しかし、提案手法には、長期間システムを運用し、ピンの抜き刺しが繰り返されると誤差が累積するという問題があった。そこで本研究では、位置の誤差の累積を見積もり、誤差の累積が少ないと予測されるピンを基準として位置を検出する手法を提案する。

さらに本稿では、位置取得の機能を活かしたプロトタイプアプリケーションの実装について述べる。

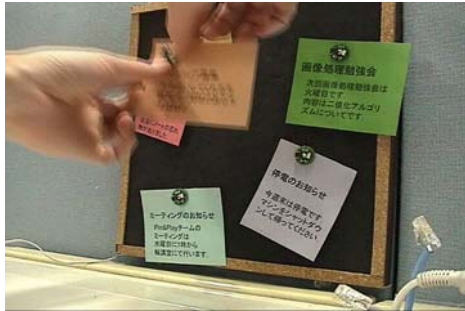


図 1: Pin&Play のプロトタイプ

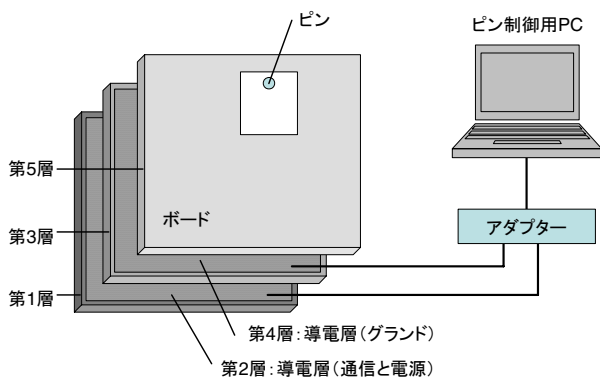


図 2: Pin&Play のシステム構成図

以下、2章でPin&Playの概要について述べ、3章でこれまでに提案したピンの位置検出手法を簡単に説明し、4章で提案する位置誤差の見積もり手法について述べる。5章で提案手法の評価を行い、6章で実装したプロトタイプアプリケーションについて述べる。7章で考察を行い、8章でまとめる。

2 Pin&Play

Pin&Playのシステム構成図を図2に示す。システムは通信および電源供給を行なうボードとそこに刺されるピン(図3)からなる[4]。ボードは5層からなり、第2層と第4層には導電性繊維の布地、第1層、第3層、第5層は絶縁性の素材である。第2層は通信と電源供給のための層であり、第4層はグラウンドの層である。ピンは図3右のように2つの端子をもち、ボードに刺し込まれるとそれぞれの端子がボードの各導電層と接続される。また、ピンはIDをもち、2色のLED(図3左)を備えている。IDに関連付けて掲示物の内容や有効期限などを記録することで、重要な掲示物の存在や有効期限切れの掲示物を留めるピンのLEDを点灯させてユーザに知らせることが可能である。

Pin&Playでは、これまでに、以下のようなアプリ

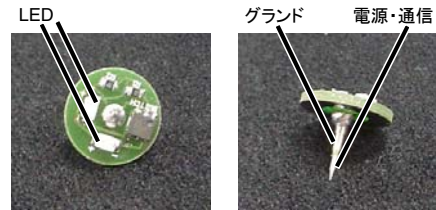


図 3: Pin&Play のピン

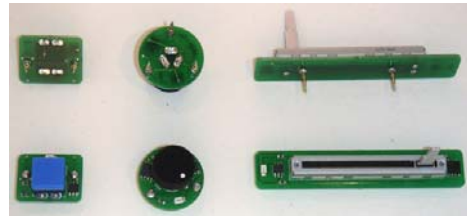


図 4: Pin&Play のデバイス (左からボタン、ダイヤル、スライダ)

ケーションを構築してきた。

Reminding Notice Board

新しい掲示物が掲示されると、その時刻が記録される掲示板である。掲示物が有効期限を過ぎると、LEDの点滅によってユーザに知らせる。

Pin&Play Wallpaper and Light Switch

建物の壁にPin&Playの層を埋め込めば、壁のどこに設置してもデバイスが動作するようになる。例えば、照明のスイッチもユーザが好きな場所に設置でき、いつでも場所を変更できる。

Reconfigurable Musical Interface

図4に示すボタン、ダイヤル、スライダといったデバイスを小型のボードの上に好きなように配置し、図5に示すように柔軟なユーザインタフェースを構築する。

Pin&Playのボードは、定期的にボード上に存在するピンのIDをチェックすることで新たなピンが刺し込まれたり、ピンが抜き取られたことを検出する。1枚のボードの全面が1つの接点となるため、ピンの差し込まれた位置は取得できない。しかし、デバイスの位置は、アプリケーションを構築する上で重要な意味をもつ。例えば、Reminding Notice Boardでは、ユーザは重要なものを目立つ位置に掲示したり、時系列順に掲示物を掲示するため、掲示物の位置が意味をもつ。また、複数のスイッチ型デバイスを一枚の壁に設置し、照明



図 5: Pin&Play によるユーザインタフェースの構築例
 や雨戸といった複数の装置を操作する際には、それぞれのデバイスを最も近い位置にある装置に対応付けられれば設定の手間が省ける。ユーザインタフェースを構築する例では、デバイスの位置関係からアプリケーションでの意味づけを自動的に設定できるようになる。

3 位置検出手法

これまでに提案した Pin&Play のための位置検出手法は以下のような特徴をもつ。

- 画像処理を用いる。
 ボードを撮影した画像を用いて位置検出を行う。ピン上の LED を点滅させ、点滅している位置を検出することでピンの位置を求める。
- 既存のピンとボードには手を加えない。
 ピンとボードに拡張を必要とせず、1 台のカメラを設置するのみで位置が取得でき、撮影した画像はアプリケーションでも利用できる。また、ピンに LED が 1 個備わっていれば位置検出が可能のため、今後新たなデバイスを開発するときの制約も少ない。
- 画像処理パラメータを自動的に調整する。
 Pin&Play のシステムは、明るい部屋の中や暗い廊下などさまざまな照明条件下での使用が予想され、さらに設置された場所によっては昼と夜で明るさが変化する。さらに、ボードの中でも一部に照明が当たっている場合など、1 台のカメラで撮影した画像中でも条件が変化することが予想される。そこで、状況に応じた画像処理パラメータを利用できるように、ピンを検出した画像を解析し、最適な値を設定する

システムの構成図を図 6 に示す。まずカメラ画像からピンが撮影されている位置を特定する。同時に取得

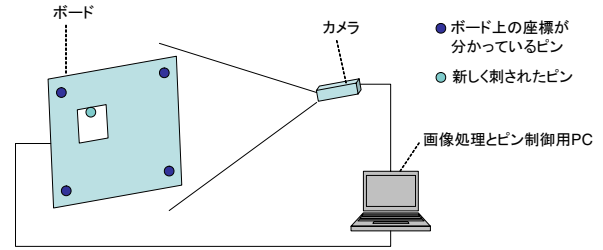


図 6: 位置検出のシステム構成図

した画像を用いて、画像処理パラメータを動的に決定する。次に基準となるピンの座標を用いてカメラ画像と実際のボード上の座標系を変換する。以下で位置取得方法について簡単に説明する。

3.1 ピンの検出

ピンの検出はピンの LED を一定時間間隔で点滅させたものをカメラで撮影し、差分画像を利用して行なう。まず、前フレームとの差分画像を作成し、グレースケールイメージに変換し、雑音除去のフィルタかける。処理した画像を二値化し、白色の成分が連結している領域を探す。連結領域の数が点滅しているピンの数と同じであれば、画面内のピンが検出できていると仮定し、その座標を記録する。この処理を繰り返し、4 回同じ座標を検出すると、その場所にピンがあるとみなす。

3.2 画像処理パラメータの調整

ピンを発見した際には、その後のピンの検出に最適な画像処理パラメータを求める処理を行う。提案手法では、差分画像を二値化する際の閾値と、二値化した後の画像上で白色連結領域をピンだとみなす最大の大きさを動的に決定する。

二値化の際の閾値は、複数の閾値で対象となるピンを検出する処理を繰り返し、その中から確実にそのピンを発見できる値を設定する。1 枚のボード上でも照明条件が変化することを考慮し、各画素を二値化する際には、最も近くに存在するピンに設定された閾値を用いる。

白色連結領域の最大の大きさは、二値化の閾値を求める処理においてピンの検出に成功した場合の平均の大きさの倍とした。ピン毎に LED の特性が異なり最適な値も異なるため、ピン毎にこの値を記録し、同じ ID のピンが再度刺されたときには記録された値を用いて白色連結領域がピンとみなせるか判定を行う。

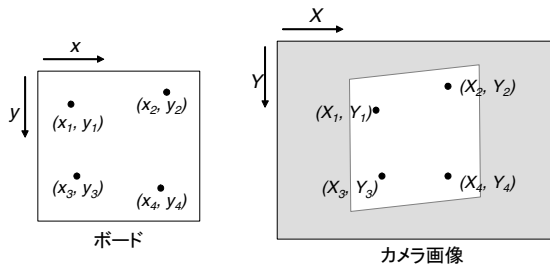


図 7: ボード上とカメラ画像上の座標

3.3 座標の変換

カメラで撮影した画像上の座標からボード上への座標の変換には射影変換を用いる。射影変換では、画像上の座標を (x, y) 、ボード上の座標を (X, Y) として、以下の式を用いて、座標系の変換を行う。

$$X = \frac{a_1x + b_1x + c_1}{a_0x + b_0y + 1}$$

$$Y = \frac{a_2x + b_2x + c_2}{a_0x + b_0y + 1}$$

この式を利用するためには係数 $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2)$ を求める必要があり、ボード上の座標と画像上の座標が分かっている 4 点 $(P_1 : (x_1, y_1), (X_1, Y_1), P_2 : (x_2, y_2), (X_2, Y_2), P_3 : (x_3, y_3), (X_3, Y_3), P_4 : (x_4, y_4), (X_4, Y_4))$ による方程式から算出する。4 点の配置の例を図 7 に示し、以降ではこの 4 点を基準点と呼ぶ。

4 誤差の見積もり

これまでに提案した手法で、位置が正確にわかっている基準点 4 点を用いると、一辺 25cm のボードを使用した場合に、250cm の距離まで 1 割以下の誤差でピンの位置が取得できることを確認している。しかし、長期的にシステムを運用する際には、基準となる点の配置が悪かったり、基準となる点に位置の誤差が含まれている場合に、誤差が累積されるという問題がある。そこで、本研究では、誤差の大きさを見積もることで、誤差が最小となるような基準点を選択し、誤差の累積を防ぐ手法を提案する。

提案手法により、初期に正確な位置を入力されたピンが抜かれた後でも、その他のピンの中から誤差が少なくなるものを選択することで、より正確にボード上の座標が得られるようになる。さらに、初期の基準点の配置が悪かった場合の影響も防げる。提案手法では、射影変換に必要な 4 つの基準点を選択する際に、ボード上の座標とカメラ画像上の座標が分かっているすべて

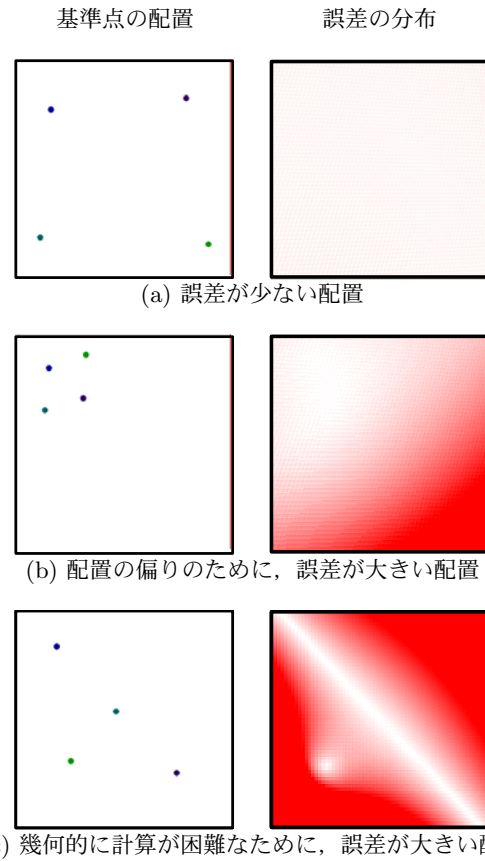


図 8: 基準点の配置と誤差の分布の関係 (濃い色の場所ほど誤差が大きい)

の点を基準点の候補として誤差の見積もりを行い、誤差が最も小さくなる基準点のセットを選択する。

基準点の配置と誤差の分布の関係の例を図 8 に示す。(a) では、基準点がボード上に均一に広がって配置されており、全体的に誤差は少ない。(b) では、基準点がボードの左上に偏っているため、基準点から距離のある右下の部分で誤差が大きくなっている。(c) では、基準点は広がって配置されているが、3 点がほぼ直線状に配置されているため、射影変換の特性により誤差が大きくなっている。このように、基準点の選択を誤ると大きな誤差の原因となる場合がある。この誤差を基準点の配置による誤差 (E_p) と呼ぶ。

誤差は基準点の配置だけでなく、画像処理や、カメラの解像度の低さによっても生じる。例えば、ボードが遠くに設置され、画像上の 1 ピクセルにボード上の座標で $10 \times 10\text{cm}^2$ の範囲が写っているとすれば、ピンの位置が正確に検出できたとしても、10cm 程度の誤差が生じる。この誤差を画像処理の誤差 (E_i) と呼ぶ。

また、誤差を含む基準点を選択した場合、計算結果

にも誤差が含まれる。基準点に累積されている誤差も基準点の誤差 (E_r) として見積もりに含める。

したがって、以下に述べる手法で計算した上記3つの誤差の和を見積もりの誤差とする。

E_p : 基準点の配置による誤差

この誤差は、理想的な位置にカメラが設置された場合においても生じる誤差を計算することで見積もる。

まず、対象となる基準点のセットを用いて位置を求めるピンのカメラ画像 (x, y) からボード上の座標 (X, Y) への変換を行う。次にボードの真正面にカメラが置かれていると仮定したアフィン変換によって (X, Y) から仮想的なカメラ上の座標 (x', y') を算出し、仮想的なカメラの座標系からボード上の座標系への射影変換の変換式を求めてボード上の座標 (X', Y') を算出し、仮の見積もりの誤差 e を以下の式によって求める。

$$e = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$$

次に誤差によって座標がずれている可能性があるため、ずれの大きさを考慮して (X, Y) の周囲 $\pm \frac{e}{2}$ の8つの近傍の点に関しても誤差を計算し、その平均を E_p とする。

E_i : 画像処理の誤差

射影変換の逆変換を用いてボード上の左上の隅と右下の隅のカメラ画像上の距離を算出し、カメラ画像上の1ピクセルの幅に対するボード上の距離を求め、 E_i とする。

E_r : 基準点の誤差

各基準点のもつ見積もり誤差の平均を E_r とする。

5 性能評価

実装した基準点の選択手法の誤差改善率を評価した。実験は図9に示す位置の誤差を計算するシミュレータを実装して行った。シミュレータでは 240×320 の大きさの画像をピンホールモデルのカメラで撮影した場合と同等の処理を行っている。

実験は以下の手順で行った。まず、ランダムに4つのピン (P_1, P_2, P_3, P_4) を基準点として配置する。ランダムに4つのピン (P_5, P_6, P_7, P_8) を配置し、その後、

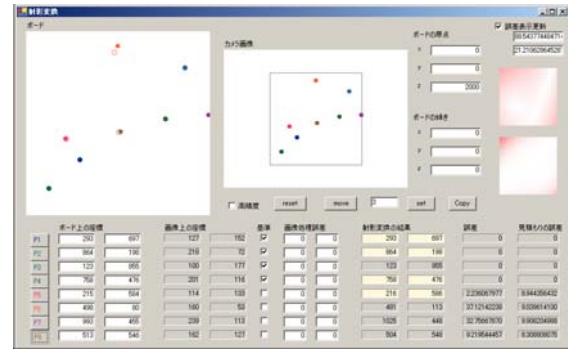
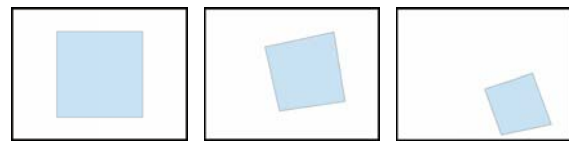


図9: 位置誤差計算シミュレータ



カメラ配置1 Position 1
カメラ配置2 Position 2
カメラ配置3 Position 3

図10: 各カメラ配置におけるカメラ画像上のボードの位置

6本のピン ($P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$) を抜いて別の位置にランダムに配置する操作を繰り返す。カメラは、カメラをボードの正面に配置したカメラ位置1とカメラがボードに対して斜めに配置されたカメラ位置2、やや遠くにカメラが配置されたカメラ位置3の3箇所に設置したものとして実験した。各カメラ配置におけるカメラ画像上のボードの位置を図10に示す。いずれも色がついていない部分がボードを意味し、その左上が座標 $(0, 0)$ となっている。

基準点を提案手法に従って選択する手法と、長く刺さっているピンを優先的に基準点とする比較手法の2通りで位置の誤差を調べた。結果を図11に示す。各カメラ配置で、ピンを20回抜き刺しした後の $P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ の誤差を求める実験を異なるピンの配置で10回行い、その結果の平均を求めた。表では、ボードの一辺に対する割合を平均誤差としている。結果より提案手法はいずれのカメラ位置においても単純に基準点を選ぶ比較手法より平均誤差が少なく、提案手法が誤差の累積を防ぐ上で有効であることが確認できた。

また、カメラ位置1でピンの抜き刺しを100回繰り返した際の誤差の累積の様子を図11に示す。初期状態で誤差が少ないように基準点を配置した配置1と基準点の配置が悪い場合の配置2の2通りの実験を行った。グラフより、提案手法では、特に配置1において誤差

表 1: 基準点選択手法の性能

	提案手法	比較手法
カメラ位置 1 の平均誤差 (%)	3.22	28.42
カメラ位置 2 の平均誤差 (%)	9.69	41.26
カメラ位置 3 の平均誤差 (%)	11.75	23.60

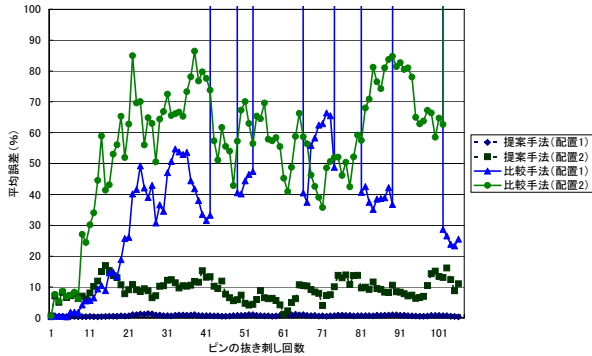


図 11: ピンの抜き差しを繰り返した際の誤差の累積

がほとんど増えないが、比較手法では、10回を超えたあたりから誤差が大きくなり、その後は実用に適さない程の大きな誤差が生じている。比較手法で誤差が急激に増えているのは、図 8(c) に示すような配置を取った場合がほとんどであり、提案手法を用いるとこのような配置を避けて基準点を選択するため、誤差の累積を防げることが分かった。

6 アプリケーション

Pin&Play の画鋲と掲示板を利用したプロトタイプでは、画鋲も掲示板も日常的に使われる道具であるため、ユーザはその使い方を容易に理解でき、掲示板に貼られている紙を俯瞰することで、掲示板全体の情報を把握できる。コンピュータディスプレイのみを使用してこのような特徴を実現することは難しい。本研究では、このような特徴をもち、デバイスの位置を活かしたアプリケーションを 2 つ実装した。

図 12 に掲示物管理アプリケーションの使用例を示す。このアプリケーションでは、Reminding Notice Board と同様に掲示物を管理でき、さらに離れた場所からもその内容を確認できる。ユーザは軌跡を入力できる専用のペンを用いて掲示物を書き、ピンを使って掲示板に貼る。掲示板上に新しくピンが刺されると、ユーザが手書きした軌跡のデータと時刻、掲示板上の位置が記録される。掲示板上の状況は Web ブラウザを介しても確認でき、ユーザが掲示板を撮影した画像の掲示物の位置をクリックすると、その掲示物の詳細な情報や貼ら

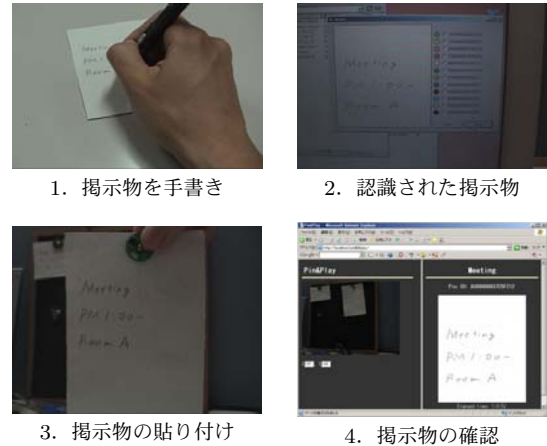


図 12: 掲示物管理アプリケーション

れた時刻が表示される。これまでの Reminding Notice Board では、掲示物の位置が取得できなかったため、掲示物の情報を列挙することしかできなかったが、位置取得が可能になったことで、掲示板を撮影した画像上の掲示物をクリックすることでその情報を得るというインタラクションが可能になる。また、ユーザが掲示物の位置を知ることができるため、中央に掲示された重要そうなものから先に確認するといった操作も可能になる。軌跡の取得には Navis社 の Navinote を使用した。

図 13 にスケジュール管理アプリケーションのスクリーンショットを示す。このアプリケーションは、研究グループや家族といった数人のグループ内でスケジュールを管理し、共有するためのものであり、ユーザはスケジュールを紙に書き掲示板に貼ることでスケジュール情報を入力し、掲示物をはがすことで情報を取り消す。掲示板はいくつかの部分に区切られており、掲示物を貼った場所によって誰に対するいつの情報であるかが記録される。現在進行中の予定を留めているピンの LED を点灯して強調し、スケジュールが重複している可能性があるときにはピンの LED を点滅させてユーザに知らせる。位置取得が可能になったため、どの時間帯の誰に対する情報なのかが紙を貼るだけで入力できる。また、スケジュールは Web ブラウザを介して、遠隔地からでも携帯電話や PC を用いて確認できる。このように、提案手法を利用することで、紙のもつ全体をつかみやすいという特徴と、電子的に管理して遠隔地からでも情報を共有できるという利点の両方を兼ね備えたアプリケーションを実現できる。

さらに、今後は図 4 に示すような多様なデバイスを

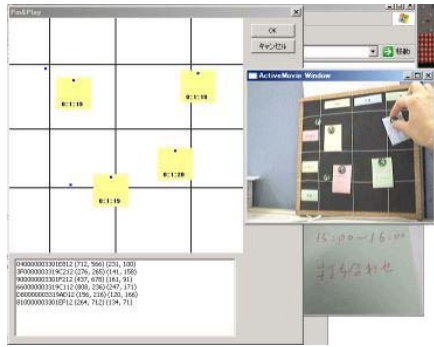


図 13: スケジュール管理アプリケーション

表 2: 全てのピンを移動させた場合の提案手法の性能

	提案手法	比較手法
カメラ位置 1 の平均誤差 (%)	6.11	107.88
カメラ位置 2 の平均誤差 (%)	9.69	90.90
カメラ位置 3 の平均誤差 (%)	17.14	46.35

使用したアプリケーションを構築する予定である。Reconfigurable Musical Interface のようにデバイスを自由に配置してアプリケーションを操作する際には、デバイスと操作の対応付けが必要となるが、これをデバイスの位置を認識することで半自動的に設定できるようになると考えている。

7 考察

評価実験の結果、ピンの抜き刺しを繰り返すと誤差が累積するが、提案手法によってその累積が防げることがわかった。カメラとボードの位置関係が固定ならば、画像上の座標系からボード上の座標系への変換式を毎回求めるのではなく、同じ式を使い続けられるため、誤差は累積しない。しかし、実際に運用する上では、カメラの位置が変更されたり、僅かにずれることも考えられるため、そのような場合に提案手法が有効になる。さらに提案手法を用いると初期の基準点では正確に位置が求められない位置に新たにピンが刺された場合であっても、それまでに位置検出の終わったピンの位置を利用してより正確に位置を求めることが可能になる。

また、実験では、2本のピンの位置が固定である状況で実験を行ったが、全てのピンを順に動かした場合の結果を表 2 に示す。表 2 より、この場合においても提案手法は比較手法よりも誤差が少なく、有効であることがわかる。また、結果は表 1 と同じ操作を行った場合のものであるが、表 1 に比べて、誤差が大きくなっている。このような場合も考慮すると、射影変換の変

換式をピンが刺される度に求めるのではなく、それまでの変換式で計算した場合の結果と見積りの誤差などを合わせてより正確な位置を求める手法も有効だと考えられるが、処理が複雑になるため現在は扱っていない。

これまでに提案された PushPin Computing のための超音波とフラッシュを使用した位置取得手法でも誤差を減らすための手法は提案されている [1]。この手法では、距離が離れるにつれて、実際より遠い距離を計測してしまうという問題があったため、算出された結果を線形の式で補間することで、誤差を減らしている。本研究とは位置検出方法が全く異なるため、この手法を本手法に適用して誤差の蓄積を防ぐことはできない。

8 まとめ

本稿では、カメラを用いた Pin&Play のピンのための位置検出手法において、誤差を見積もることによる累積を防ぐ手法を提案した。また、評価実験によって提案手法の有効性を明らかにした。さらに提案手法によって可能になった、2つのピンの位置を利用したアプリケーションの構築について述べた。

今後の課題としては、複数のボードと複数のカメラが存在する状況への提案手法の拡張、遠隔地からボードやカメラを利用したアプリケーション構築のための枠組みの実現や、提案手法を用いたアプリケーションの構築、アプリケーションを実運用する上での提案手法の評価と改善などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] M. Broxton: "Localization and Sensing Applications in the Pushpin Computing Network," master of engineering thesis, MIT (Jan. 2005).
- [2] 岸野泰恵, 寺田 努, N. Villar, H.-W. Gellersen, 西尾章治郎: "壁面を利用したピン型入出力デバイスのためのカメラを用いた位置検出手法," 情報処理学会研究報告 (ユビキタスコンピューティングシステム研究会 2005-UBI-7), Vol. 2005, No. 28, pp. 147-154 (Mar. 2005).

- [3] K. Van Laerhoven, N. Villar, A. Schmidt, H.-W. Gellersen, M. Hakansson, and L. E. Holmquist: "Pin&Play: The Surface as Network Medium," IEEE Communications Magazine, Vol. 41 No. 4., ISSN: 0163-6804, IEEE Press, pp. 90–96 (Apr. 2003).
- [4] Pin&Play: <http://ubicomp.lancs.ac.uk/pin&play/>.