

熱を用いた2次元マーカの検討

湯村 翼^{1,a)}

概要：物理空間にある物体への情報付与や Web 連携のために、QR コードなどの2次元情報マーカが使われる。現在、情報マーカの読み取り機器はスマートフォンが主流であるが、今後は読み取りにスマートグラスを利用することが増えるであろう。スマートグラスでの読み取りは便利であるものの、可視光カメラで周囲を常時撮影することは、周囲の人や環境のプライバシーを侵害する恐れがある。そこで本研究では、スマートグラスでの情報マーカ読み取りに可視光カメラではなく熱赤外線カメラを利用することを提案する。そのために、熱赤外線カメラで読み取ることのできる熱情報マーカを開発する。本論文では、ペルチェ素子を用いた遮蔽型と伝導型の2種類の方式のマーカと、組込み機器用熱赤外線センサを用いた認識機をプロトタイプとして開発した。開発したシステムを用いて認識率を計測し、実用可能な精度であることを確認した。現在、スマートグラスはそれほど普及しておらず、熱赤外線センサも搭載されていない。しかし、熱マーカがスマートグラスにおけるプライバシーの懸念を払拭するキーテクノロジーとなれば、スマートグラスの普及を推し進めることができるだろう。

1. はじめに

物理空間に存在する物体に対する情報付加や Web サービス連携のために、2次元情報マーカが用いられる。現在よく用いられる情報マーカのひとつが QR コードである。QR コードは雑誌やポスターに印刷される他、実店舗の決済システムや鉄道の自動改札などにも用いられる。また、物理空間の位置情報を取得するための情報マーカもあり、ロボットなどの移動体の誘導や、Augmented Reality(AR)アプリケーションなどに用いられる。

人が情報マーカの読み取りを行う際、現在はスマートフォンのカメラを用いることが多い。しかし、今後はスマートグラスのようなメガネ型ウェアラブルデバイスで情報マーカを読み取ることが増えるであろう。スマートグラスは、2021年現在では日常的に使われるほど普及はしていないが、今後開発が進むにつれて安価になり小型化し普及していくであろう。スマートグラスでの情報マーカ読み取りは、視線をマーカに向けるだけでよいため端末操作を省くことができる。さらにマーカを認識すると同時に情報を視界に表示することが可能なため、利便性が高い。しかし、マーカ認識のためにスマートグラスの可視光カメラを常時起動することは、プライバシー侵害の懸念がある。すれ違う人の顔や周囲の生活環境を常時撮影し続けることは、た

とえその映像が保存されないとしても、多くの人にとって受け入れ難いであろう。

そこで私は、スマートグラスでの情報マーカ読み取りに可視光カメラではなく熱赤外線カメラを利用することを提案する。そのために、本研究では、熱赤外線カメラで読み取ることのできる熱情報マーカを開発する。熱赤外線カメラは、熱赤外線とよばれる7~15 μm の電磁波を計測し、物体の熱の放射を感知する。そのため、ある特定の形状に熱を発するよう物体を配置すれば、熱赤外線カメラが情報マーカとして読み取ることができる。同時に、熱赤外線カメラは、可視光での撮影のような詳細情報は取得できないため、プライバシーを守りつつマーカを読み取ることができる。

本研究では、熱マーカの実用可能性を探るため、ペルチェ素子を用いて熱マーカのプロトタイプ開発を行った。熱マーカの実装方式として、遮蔽型と伝導型の2種類を検討し開発した。また、マーカの認識器を開発した。

2. 関連研究

2.1 不可視マーカ

通常の状態では可視光で見ることのできない、不可視マーカと呼ばれる種類の情報マーカが過去に研究されてきた。不可視マーカには、再帰性反射材によって作成されたマーカに赤外線や紫外線を照射してその反射を読み取るもの [1] [2] や、近赤外線を放射するインクを用いるもの [3] がある。これらは、景観やコンテンツを阻害しないことを目

¹ 北海道情報大学
Hokkaido Information University, Ebetsu, Hokkaido
069-8585, Japan

^{a)} yumu@yumulab.org

的として開発されてきた。可視光以外の情報を2次元マーカとして用いる点は本研究と共通であるが、本研究とは目的が異なり、用いる波長も異なる。

2.2 熱赤外線を利用した情報マーカ

熱赤外線をマーカとして用いる研究として、滝沢らの研究[4]がある。しかしこの研究はモーションキャプチャ用のマーカであり、本研究で対象とする2次元マーカではない。

熱赤外線を用いた2次元マーカの先行研究として、Thermal-ID[5]がある。Thermal-IDは、熱を遮蔽するアルミ箔をマーカ形状に切り出して人体に貼り付ける。熱赤外線で人体を観測すると、マーカに遮蔽された部分のみが熱を発さないため、マーカ形状を読み取ることができる。これは個人認証を目的とした研究である。ドローンの姿勢推定を目的としたマーカでも熱赤外線を用いた2次元マーカが研究されている[6]。この研究では、2次元パターンでカットされたアクリルが、ヒーターの赤外線を遮蔽してマーカを作成する。これらの先行研究は、熱赤外線で2次元マーカを作成する点は本研究と共通である。しかし、これらの研究は、その場の既存の熱源を利用することが前提である。本研究では、さまざまな場所で利用することを想定しているため、どこでも使用可能なポータブルな熱マーカを開発する。

2.3 熱を利用した触覚インタフェース

これまで、熱を用いた様々な種類のコンピュータインタフェースが研究され、温冷の触覚を提示する熱触覚ディスプレイと呼ばれる種類のデバイスが研究された。その多くに、本研究と同様にペルチェ素子が用いられている。手で触れて温冷を感じる種類のものとして、Thermoes-thesia[7], Thermo-Paradox[8], Thermo-Tracer[9], Thermo-Drawing[10], ThermoTouch[11]などがある。これらの研究では、ペルチェ素子を格子状に配置して、それらを制御する装置が開発された。また、ウェアラブル型の熱触覚ディスプレイも研究されてきた。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)の内部にペルチェ素子を貼り付けるものにはThermoVR[12]やAmbiotherm[13]などが、腕に装着するものにはTherModule[14]などがある。

ペルチェ素子以外の熱源を用いる熱触覚ディスプレイもある水流を用いた熱触覚ディスプレイは、手で触れるものにはSakaguchi et al.の研究[15]、腕に装着するウェアラブルタイプのものにはTherminator[16]がある。熱源として赤外線ヒータを用いるものもあり、市橋らの研究では赤外線ヒータの熱の伝達を遮蔽機構によって制御し温度を提示する[17]。

これらの研究は、本研究と同様に熱をインタフェースとして利用する。しかし、熱の温冷を人に体感させることを

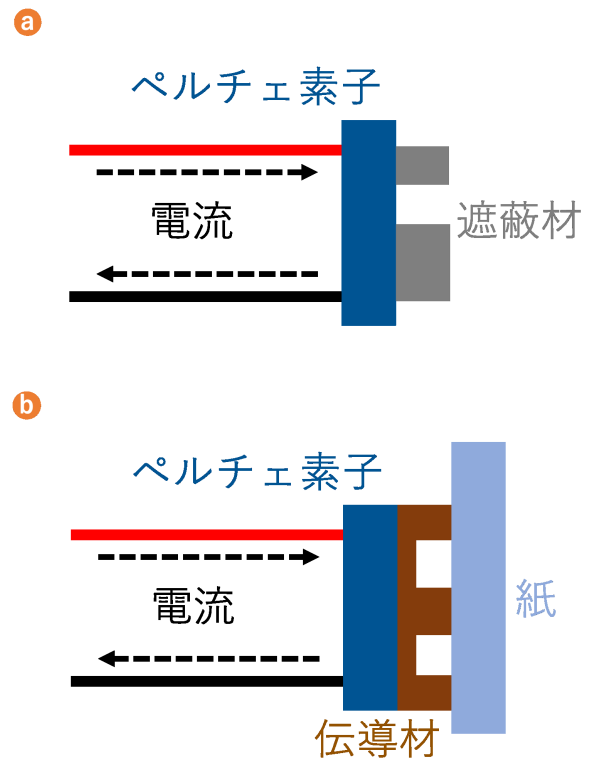


図1 熱マーカの構造の概要図。(a) 遮蔽型熱マーカ。熱の遮蔽材としてダンボールを用いる。(b) 伝導型熱マーカ。熱の伝導材として銅を用いる。

目的としている。そのため、コンピュータへの情報伝達のために熱を用いる本研究とは目的が異なる。

2.4 熱を利用した可視化インタフェース

熱を利用して物理的な変化を引き起こして可視化を行うディスプレイも研究されてきた。Evaporation Display[18]は、熱による水の蒸発を利用したディスプレイである。Ketsuro-Graffiti[19]は、格子状に配置されたペルチェ素子を用いて結露を発生させてディスプレイとするものである。Mosaic Textile[20]やThermo-Pict[21], Thermo-Pict neo[22], Syncretism[23], Inkantatory Paper[24]など、熱で色が変わるサーモクロミックインクなどの素材を用いたインタフェースも研究される。ペルチェ素子とサーモクロミックインクを用い、任意の2次元マーカを表示するdMarkers[25]という研究もある。これらの研究は、本研究と同様に熱を利用してパターンを生成する。しかし、これらの研究は最終的に可視光で情報を提示するため、熱赤外線を直接読み取る本研究とは異なる。

3. 熱マーカシステムのプロトタイプ開発

3.1 熱マーカ

本論文では、2つの方式で熱マーカを実装した。ひとつは遮蔽型、もうひとつは伝導型である(図1)。いずれも、熱源としてペルチェ素子を用いた。ペルチェ素子は、電流

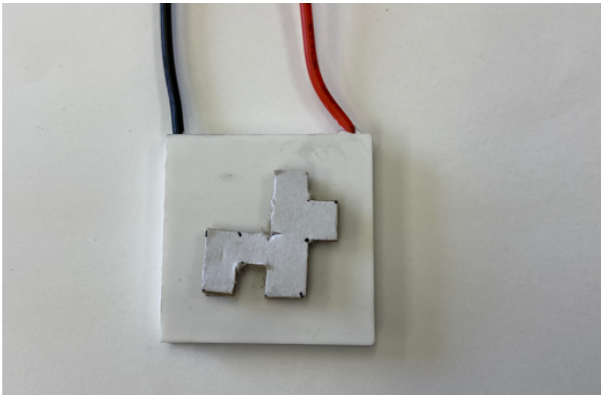


図 2 遮蔽型熱マーカ。ペルチェ素子の上に遮蔽材としてダンボールを配置した。

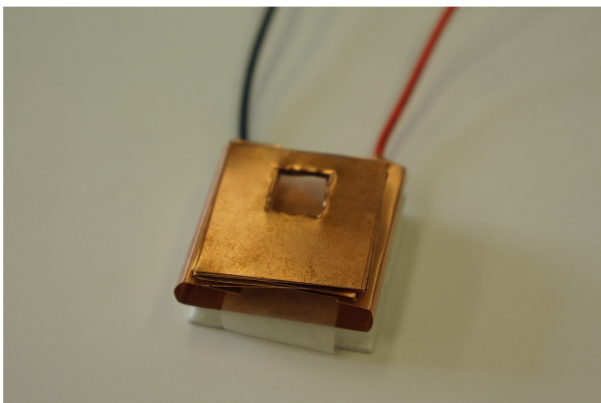


図 3 伝導型熱マーカ。ペルチェ素子の上に伝導材として銅板を配置した。使用時にはこれを紙に貼り付ける。

を流すと片面が発熱し、もう一方の面が吸熱する。本論文では、温面と冷面のいずれも試作に用いた。本論文で用いたペルチェ素子のサイズは 3cm 四方である。

遮蔽型では、マーカの形状に切り取った遮蔽材をペルチェ素子に配置する。遮蔽材が熱を遮蔽するため、熱によりマーカのパターンが形成される。本論文では遮蔽材としてダンボール片を用いた(図 2)。導電型では、マーカの形状に切り取った伝導材をペルチェ素子と密着させ、さらにその上に紙を貼り付ける。本論部では、伝導材として銅を用いた(図 3)。銅には熱伝導性があるため、ペルチェ素子が銅を通じて表面の紙に熱を伝える。

マーカのパターンには ArUco [26][27] を用いた。ArUco は、ロボットや拡張現実などで用いるための位置を取得するマーカシステムで、画像処理ライブラリ OpenCV にモジュールとして含まれる。

3.2 認識機のハードウェア

マーカの認識には、Windows PC に熱赤外線センサを接続して構成した認識機を用いる。熱赤外線センサには、Teledyne FLIR 社製の Lepton 2.5[28] を用いた。このセンサは、波長 8~14 μm を対象とし、80x60 ピクセルの解像度で毎秒 9 フレームで撮像することができる。このセンサを

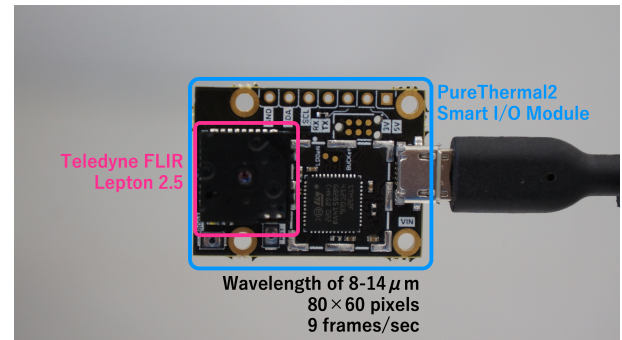


図 4 認識機の熱赤外線センサ。USB ケーブル経由で PC と接続される。

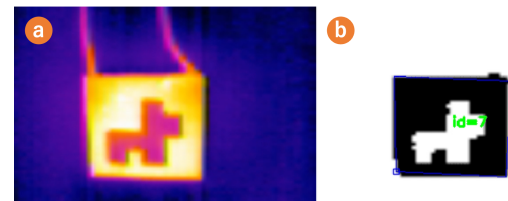


図 5 ペルチェ素子の温面を用いたマーカの熱赤外線センサによる撮像。(a) カラーコンター画像。(b) 二値化画像。

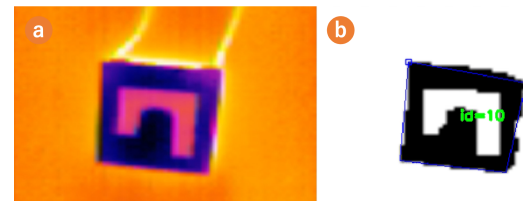


図 6 ペルチェ素子の冷面を用いたマーカの熱赤外線センサによる撮像。(a) カラーコンター画像。(b) 二値化画像。

PureThermal 2 Smart I/O Module[29] というボードに載せる(図 4)。このボードは USB ケーブルで PC と接続され、libuvic という規格で熱赤外線センサを通常の Web カメラとして利用することができるようになる。

3.3 認識機のソフトウェア

熱赤外線センサで取得した画像は Windows PC で処理する。画像処理を行うプログラムは Python で記述し、OpenCV ライブラリと ArUco モジュールを用いた。センサから送られる画像は、温度がカラーコンターで示された画像である。カラーコンターは、温度の高い方から順に白、橙、赤、紫、黒で示される。

ペルチェ素子の温面を用いたマーカでは、温度が高い箇所がマーカのパターンを示す(図 5a)。同様に、冷面を用いたマーカでは温度が低い箇所がパターンを示す(図 6a)。このカラーコンター画像からマーカパターンを読み取るため、色の閾値を設定して二値化を行った。ArUco を用いた認識プログラムは、認識が成功すると ID を表示する(図 5b,6b)

4. 評価

前節の通り開発した熱マーカのプロトタイプシステムで、遮蔽型および伝導型の熱マーカのいずれもマーカとして認識することができた。実用性についての評価と議論を行うため、マーカ認識率の時間変化を計測した。マーカは遮蔽型マーカを用い、温面と冷面のいずれの場合も計測した。マーカパターンはArUco ID 7(図2,5)のものをを用いた。計測実験では、ペルチェ素子に電源を投入し、30秒後に電源を切断した。1秒間に10回程度の認識試行を行い、その成否をカウントし、1秒ごとの認識率を算出した。認識器の熱赤外線センサは、マーカから8cm程度離れた箇所に固定した。測定は無風の屋内で行った。測定時の室温は23.6℃であった。

計測結果を図7に示す。冷面を用いたマーカは、電源投入5秒後あたりから認識に成功し始め、電源投入9秒後からは電源切断まで認識率100%を保った。電源切断後はただちにマーカを認識しなくなった。一方、温面を用いたマーカは、電源投入直後から認識に成功し始めたが、認識率が100%を保つことはなく、認識率は不安定であった。電源切断後も、マーカを完全に認識しなくなるまでに5秒かかった。

冷面を用いたマーカは、認識率が安定しており、電源切断直後の応答もよく、温面を用いたマーカよりも総じて高性能である。ただし、電源投入直後の応答性のように温面の方が優れている面もある。

本論文でのプロトタイプ開発では、ペルチェ素子に遮蔽材が接触している。そのため、時間が経つにつれて遮蔽材が温まり、温面を用いたマーカの認識率が安定しなかった可能性がある。遮蔽型マーカを作成する場合、遮蔽材と熱源を非接触にするなどの工夫が必要であろう。本論文における熱マーカはプロトタイプ開発段階であり、構造が最適であるとは言えず、改善の余地がある。

なお本論文では、遮蔽型だけではなく伝導型マーカも開発し、認識可能であることを確認した。伝導型マーカの認識率の計測は行っていないが、熱伝導を用いるため、遮蔽型に比べて応答時間は非常に長い。つまり、電源を切断してもマーカを維持できるという特徴を持つ。この特徴を活用し、常時電源を投入するのではなく間欠的に電源を投入することで、マーカの消費電力を抑えられる可能性がある。

5. ユースケース

本研究では、プライバシー保護を目的として熱マーカを開発した。ただし、熱マーカシステムの用途はそれだけにとどまらず、様々なユースケースが考えられる。まず、可視光ではマーカを読み取ることができない暗い場所でも使用可能である。暗い環境でも使えるため、夜間のドローン

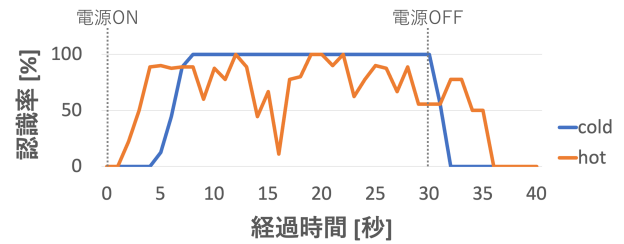


図7 ペルチェ素子の温面と冷面を用いた場合のマーカ認識率の比較

や暗闇で作業する自律ロボットが測位可能となる。また、アミューズメント施設などでの暗い環境におけるインタラクティブ演出などにも使用可能である。実際にマーカと認識機を囲った暗い状況下における読み取り実験を行い、マーカが認識できることを確認した(図8)。

また、明るい場所においても、熱マーカの見えないという特徴が利点になり得る。ポスターの裏に貼り付ければ、ポスター表面に印刷されるマーカの代替に用いることができる。通常のマーカとは違い、コンテンツのデザインを阻害せずにマーカを付与できる。ポスターの裏に伝導型熱マーカを貼り付けて読み取り実験を行い、マーカが認識できることを確認した(図9)。

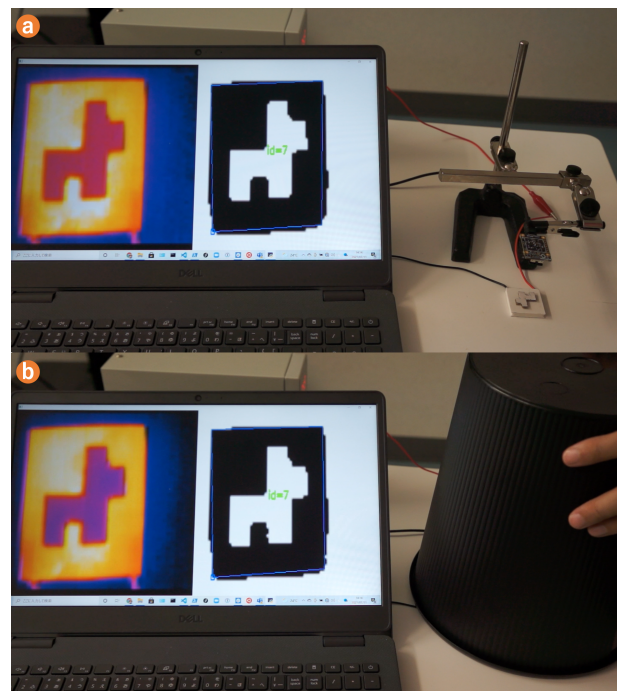


図8 暗い場所でのマーカ読み取り実験の様子。(a) 明るい状況でのマーカ認識。(b) マーカと認識器を囲って暗くなった状況でもマーカが認識できる。

6. 議論

6.1 金属の性質について

本論文の伝導型マーカでは、ペルチェ素子に熱伝導材として銅を貼り付けた上に、さらに表面に紙を重ねている。銅の表面の金属光沢には熱赤外線を反射する性質があるた

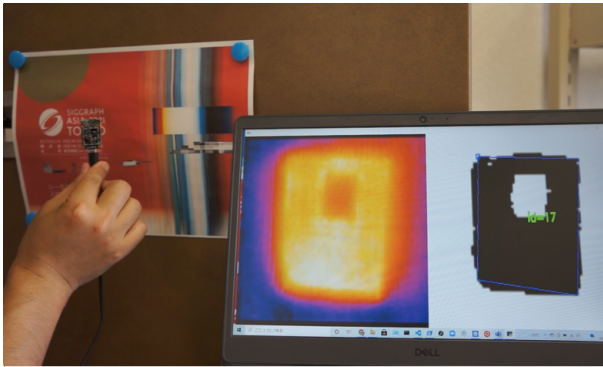


図 9 ポスターの裏側に貼り付けたマーカの読み取り実験。伝導型のマーカを取り付け、マーカ認識に成功した。

め、銅を熱赤外線カメラで直接撮影しても、銅から発する熱赤外線ではなく反射した周囲の熱赤外線をとらえてしまう。そのため、表面に紙を乗せるという形態の伝導型マーカを開発した。また、熱赤外線を反射するという金属の性質を利用して、遮蔽型マーカの遮蔽材に金属を用いることも考えられる。しかし、周囲に熱赤外線源がある場合には、その熱赤外線を反射してしまい、マーカの形状を認識できない可能性がある。私が実験を行った際には、天井の蛍光灯の熱赤外線を反射してしまい、マーカを認識できない場合があった。

6.2 ジュール加熱を用いた熱マーカの検討

今回のプロトタイプ開発ではペルチェ素子を用いた。電気から熱を発生させるためのよく知られた他の方法として、ジュール加熱もある。ジュール加熱とは、電気を流した際に電気抵抗で発生する熱を用いた加熱方法である。私はこの方法も検討し、Adafruit 社の電熱パッド [30] や EeonTex 社の導電布 [31] などの電気で発熱する素材を用いて熱マーカの試作を行った。しかしながら、前者の電熱パッドでは電気が流れる繊維の目が粗く、電流経路に隙間ができる。後者の導電布では電流が最短経路を通るため、電流経路が広がらない。ジュール熱は電気の流れた場所にのみ発生するため、いずれもマーカとして認識できるような任意の温度分布を形成することができなかった。加えて、ペルチェ素子と比べて応答速度が遅いという課題もあった。そのため、本論文でのマーカ開発にはジュール加熱ではなくペルチェ素子を用いた。ただし、ジュール加熱を用いる方式には、シンプルな機構や低コストなどのメリットがあり、また、熱伝導物質と合わせる等の改善の余地もあると考える。ジュール加熱を用いた熱マーカの開発についても、引き続き検討を行っていく。

6.3 電氣的構造を用いない熱マーカの検討

本論文ではペルチェ素子を用いた熱マーカを開発し、上述の通りジュール加熱による熱マーカも検討しているが、

他の手段として電氣的構造を用いない熱マーカも考えられる。その一例が、蓄熱素材をマーカとして利用することである。太陽光熱の蓄積により温度差を生成する蓄熱素材をマーカ形状に配置すれば、熱マーカとしての利用可能性がある。蓄熱素材は、紙や看板、建築壁面などに塗布することや、それらの素材に練り込むことを想定する。また、熱マーカは物体を温めるだけでなく冷やすことでも実現できる。雪や氷は、物体を冷やし周囲との温度差を生み出すことができる冷却材として使用できるため、これらも熱マーカの材料となりうる。

6.4 格子状マーカの検討

熱マーカの形態は、さらなる発展も考えられる。今回のプロトタイプでは、1枚のペルチェ素子を1つのマーカに利用した。他の方法として、ペルチェ素子を格子状に並べ、全体で1つのマーカとする方法もある。ArUco マーカのパターンは、6x6の解像度があれば表現できる。ペルチェ素子を格子状に配置する装置の開発には、2.3節、2.4節で関連研究として挙げた ThermoTracer[9]、Ketsuro-Graffiti[19]、dMarkers[25]などが参考になる。これらの研究は、目的は異なるが、熱を制御して熱のパターンを形作る点は共通しており、機構などは大いに参考となる。

6.5 マーカと認識機の解像度

本論文でマーカパターンとして用いた ArUco は位置検出を目的としており、認識しやすい一方でマーカが持つ情報量は少ない。しかし、QRコードのような細かいパターンを熱マーカに用いれば、より多くの情報を伝達できる。それには、本論文で用いたものよりもさらに高解像度の熱赤外線センサが必要である。

また、その反対に、本論文よりもさらなる低解像度の熱赤外線センサを用いれば、さらに安価に認識器を実装できるようになる。低解像度の熱赤外線センサは赤外線アレイセンサとも呼ばれる。8×8ピクセルの解像度を持つパナソニック社製の赤外線アレイセンサ AMG8833 (Grid-EYE) [32] はセンサ単体で4,000円程度で市販される。これは、本論文で用いた熱赤外線センサ Teledyne FLIR Lepton 2.5の1/10程度の価格である。このような低解像度の熱赤外線センサを用いる場合、正しく認識できるようマーカのパターンを改良する必要がある。

6.6 スマートグラスへの搭載

本研究は、スマートグラスへの搭載を念頭に置いて実施している。スマートグラスへの搭載に際し課題となると考えられる事項として、コスト、認識精度、認識可能距離が挙げられる。コストについては前述の議論にて触れており、低コストな低解像度センサを用いるなどの方策が考えられる。認識率は、本論文においても評価を行っており、実

用可能である旨を記載した。認識可能距離は、本論文のプロトタイプを用いて計測したところ最大 10cm 程度であった。ただしこれは熱赤外線センサの解像度と、3cm 四方のペルチェ素子を用いたマーカに依存するため、熱マーカの本質的な制約ではない。現在の 2 次元マーカを利用する際にも、ある程度の至近距離まで近づかないと認識できない場合が多いが、スマートグラスでの利用を考えると 1m 程度の距離で認識可能であると利便性が高いだろう。

7. まとめ

本論文では、プロトタイプ実装としてペルチェ素子を用いた熱マーカを開発した。ペルチェ素子は発熱と吸熱の応答が早いので、利用の有無に応じてマーカの ON と OFF を切り替えることができる。また、組込み機器向けの低解像度の熱赤外線センサを用いて認識器を実装し、マーカが認識可能であることを示した。

本研究は、いずれ訪れるであろうスマートグラスが普及した社会において役立つことを念頭に置いたものである。熱赤外線カメラは現在スマートグラスに標準的に搭載されるものではない。しかし、周囲の人の認識や体温計測に用いることで COVID-19 のような発熱を伴う感染症の感染防止に役立つため、今後スマートグラスに搭載される可能性は十分にある。スマートグラスが普及する頃には、街はスマートシティと化し、道路や公園のベンチなど、街中の様々なオブジェクトが情報伝達を行う。その一端を熱情報マーカが担うかもしれない。

人は、取得する情報の多くを視覚に頼る。現在、PC やスマートフォンなどの情報機器を用いて視覚による情報取得が行われているが、ハンズフリーで直接的に情報を視覚へ入力できるスマートグラスは、情報取得の利便性を確実に高める。しかしながら、スマートグラスの普及の大きな障壁のひとつが、搭載カメラによるプライバシーの問題である。本研究で開発する熱情報マーカがスマートグラスにおけるプライバシーの懸念を払拭できれば、スマートグラスの普及をより推し進めることができるだろう。

謝辞 本研究は公益財団法人 GMO インターネット財団令和 4 年度 GMO 研究助成制度の助成を受けて実施しました。

参考文献

- [1] Nakazato, Y., Kanbara, M. and Yokoya, N.: Localization system for large indoor environments using invisible markers, *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 295–296 (2008).
- [2] Kamijo, K., Kamijo, N. and Gang, Z.: Invisible barcode with optimized error correction, *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, pp. 2036–2039 (2008).
- [3] Park, H. and Park, J.-I.: Invisible marker tracking for AR, *Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE, pp. 272–273 (2004).
- [4] Takizawa, K., Okamoto, Y., Sakashita, R., Kamoi, A. and Vavilov, V. P.: Simultaneous visualization study on dynamic motion and temperature in moving bodies by means of infrared radiometer, *Thermosense XXV*, Vol. 5073, International Society for Optics and Photonics, pp. 160–167 (2003).
- [5] Kitahara, I., Ito, M., Noma, H., Kogure, K. and Hagita, N.: *Thermal-ID: A Personal Identification Method Using Body Temperature*, Citeseer (2005).
- [6] Khattak, S., Papachristos, C. and Alexis, K.: Marker based thermal-inertial localization for aerial robots in obscurant filled environments, *International Symposium on Visual Computing*, Springer, pp. 565–575 (2018).
- [7] Kushiya, K., Inose, M., Yokomatsu, R., Fujita, K., Kitazawa, T., Tamura, M. and Sasada, S.: Thermoesthesia: about collaboration of an artist and a scientist, *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, pp. 142–es (2006).
- [8] Kushiya, K., Baba, T., Doi, K. and Sasada, S.: Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: "Thermo-Paradox", *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, pp. 1–1 (2010).
- [9] 串山久美子, 馬場哲晃, 土井幸輝, 笹田晋司: 冷温提示による小型触覚ディスプレイ「Thermo-Tracer」の開発, インタラクシオン (2010).
- [10] 串山久美子, 土井幸輝, 笹田晋司, 馬場哲晃: Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発, インタラクシオン (2012).
- [11] Kratz, S. and Dunnigan, T.: Thermotouch: a new scalable hardware design for thermal displays, *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 132–141 (2017).
- [12] Peiris, R. L., Peng, W., Chen, Z., Chan, L. and Minamizawa, K.: Thermovr: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5452–5456 (2017).
- [13] Ranasinghe, N., Jain, P., Karwita, S., Tolley, D. and Do, E. Y.-L.: Ambiotherm: enhancing sense of presence in virtual reality by simulating real-world environmental conditions, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1731–1742 (2017).
- [14] Maeda, T. and Kurahashi, T.: Thermodule: Wearable and modular thermal feedback system based on a wireless platform, *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, pp. 1–8 (2019).
- [15] Sakaguchi, M., Imai, K. and Hayakawa, K.: Development of high-speed thermal display using water flow, *International Conference on Human Interface and the Management of Information*, Springer, pp. 233–240 (2014).
- [16] Günther, S., Müller, F., Schön, D., Elmoghazy, O., Mühlhäuser, M. and Schmitz, M.: Terminator: Understanding the interdependency of visual and on-body thermal feedback in virtual reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14 (2020).
- [17] 市橋爽介, 堀江新, 柏野善大, 吉田成朗, 脇坂崇平, 稲見昌彦: 遮蔽機構を用いた赤外線放射強度の制御による高速温度提示, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集, Vol. 2021, pp. 299–304 (2021).
- [18] Sonoda, T., Tanaka, T. and Matsushita, M.: A nonlumi-

- nous display that controls the evaporation velocity, *ACM SIGGRAPH 2013 Posters*, pp. 1–1 (2013).
- [19] Tsujimoto, Y., Itoh, Y. and Onoye, T.: Ketsuro-graffiti: An interactive display with water condensation, *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 49–55 (2016).
- [20] Wakita, A. and Shibutani, M.: Mosaic textile: wearable ambient display with non-emissive color-changing modules, *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 48–es (2006).
- [21] Takada, K., Higurashi, K., Suzuki, T., Ota, M., Baba, T. and Kushiya, K.: Temperature design display device to use peltier elements and liquid crystal thermograph sheet” Thermo-Pict”, *SIGGRAPH’09: Posters*, pp. 1–1 (2009).
- [22] Kushiya, K., Baba, T., Doi, K. and Sasada, S.: Temperature design display device to use peltier elements and liquid crystal thermograph sheet: ” Thermo-Pict neo”, *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, pp. 1–1 (2010).
- [23] 辻航平, 脇田玲: Material Syncretism: 紙とコンピューテーションの調和による表現の開拓 (特集 アート & エンタテインメント 3), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 305–314 (2013).
- [24] Tsujii, T., Koizumi, N. and Naemura, T.: Inkantatory paper: dynamically color-changing prints with multiple functional inks, *Proceedings of the adjunct publication of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 39–40 (2014).
- [25] Peiris, R. L., Fernando, O. N. N., Bee, C. S., Cheok, A. D., Ganesan, A. G. and Kumarasinghe, P.: dMarkers: ubiquitous dynamic makers for augmented reality, *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, pp. 217–224 (2011).
- [26] Garrido-Jurado, S., Munoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. and Medina-Carnicer, R.: Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming, *Pattern Recognition*, Vol. 51, pp. 481–491 (2016).
- [27] Romero-Ramirez, F. J., Muñoz-Salinas, R. and Medina-Carnicer, R.: Speeded up detection of squared fiducial markers, *Image and vision Computing*, Vol. 76, pp. 38–47 (2018).
- [28] FLIR, T.: Lepton LWIR Micro Thermal Camera Module, <https://www.flir.jp/products/lepton/>.
- [29] GroupGet: PureThermal 2 - FLIR Lepton Smart I/O Module, <https://groupgets.com/manufacturers/getlab/products/purethermal-2-flir-lepton-smart-i-o-module>.
- [30] Adafruit: Electric Heating Pad, <https://www.adafruit.com/product/1481>.
- [31] EeonTex: Thermionyx Nonwoven, <http://eeonyx.com/products/thermionyx-nonwoven/>.
- [32] Panasonic: AMG8833 - Grid-EYE, <https://industrial.panasonic.com/jp/products/pt/grid-eye/models/AMG8833/>.