

パッシブ IR ステレオイメージングによる水素火炎の可視化と測距

荻田 将一

株式会社四国総合研究所（〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109-8）

Visualization and Ranging of Hydrogen Flames by Passive IR Stereo Imaging

Masakazu OGITA

Shikoku Research Institute Inc., 2109-8 Yashima-nishimachi, Takamatsu-shi, Kagawa-ken 761-0192

Abstract: A new hydrogen flame visualization device applying passive IR imaging and stereo imaging was developed for the purpose of developing a security device to visualize invisible hydrogen flames and to obtain distance information. As a field-applicable device, a wearable device was applied to develop a portable and hands-free device. The ability to confirm the location, size, and distance of a hydrogen flame enables operators to quickly recognize the source of the danger. Using the developed device, we confirmed the visualization and distance measurement functions of a hydrogen flame up to 10 m. This paper reports the results of the research and development.

Key Words: Hydrogen flame, Passive IR imaging, Stereo imaging

1. 背景

水素は二酸化炭素を排出しない脱炭素燃料としてこれからの利用拡大が期待されている¹⁾。水素火炎は炭化水素火炎とは異なり無色透明であり目視できないことから、水素利用の現場では水素火炎が発する紫外線を検知する火炎検知器の設置が義務付けられている。しかし、現行の火炎検知器は火炎の有無を判定して警報発報することを基本としており、水素火炎の位置の特定や規模の判定を行う能力を持たない²⁾。水素由来の火災の現場を想定した場合、単純に水素火炎を確認するだけでなく、位置や規模を確認できる装置が望ましい。著者らはこれまでに水素の燃焼時に発生する紫外光、赤外光を撮像し、画像処理をすることで水素火炎の領域を画像として可視化する水素火炎可視化装置を開発している^{3,4)}。

対象物質を撮像し、且つ距離情報を取得することが可能な技術としてはステレオイメージングがある。ステレオイメージングは安価に距離検出が可能な有用な技術である一方、透明物質の検出は困難である。このことから単一の装置でリアルタイムに透明物質を画像として検出し、且つ距離情報を取得する安全機器は、現状存在していない。これらの背景に鑑み、目視できない水素火炎を可視化し、距離情報を取得する保安機器の開発を目的として、新たにパッシブ IR イメージングとステレオイメージングを適用した水素火炎の可視化装置を開発した。本稿では装置の検出原理や詳細について報告する。

2. 計測手法

2.1 水素火炎の可視化手法

Fig.1 は昼間屋外と屋内における燃焼中の水素火炎の視認性を比較した事例である。Fig.1(a)のとおり、昼間屋外で水素火炎はほぼ視認できない。Fig.1(b)のような外乱光のない屋内暗室では、僅かに発光が確認されるが、これは使用した CMOS カメラの分光感度特性により確認できるものである。水素火炎の場合、燃料に炭素を含まず、可視光を出す CH のラジカル発光がないため、実環境での視認は非常に困難である。

Fig.2 は水素火炎の紫外から近赤外領域における発光スペクトルと地表で観測される太陽光スペクトル⁵⁾を示している。Fig.2 に示す通り、水素火炎は可視領域に発光が無い一方、紫外や近赤外領域には発光が存在しているため、これらの水素火炎の燃焼由来の自発光を選択的に捉えることで水素火炎の可視化が可能となる。著者らが過去に開発した水素火炎可視化装置の内、現場に携帯することを想定して開発した装置では、この近赤外領域の発光を捉えるパッシブ IR イメージングを適用しており、925-950 nm の水素火炎の発光のピークを含む画像と、水素火炎の発光の弱い 870-900 nm の画像を合成処理することで可視化画像を出力している。Fig.3 にパッシブ IR イメージングとサーマルイメージングでの水素火炎の撮像を示す。

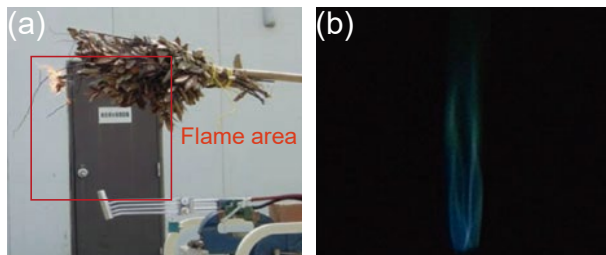


Fig.1 Visibility of hydrogen flame. (a) Daytime outdoor (b) Indoor darkroom

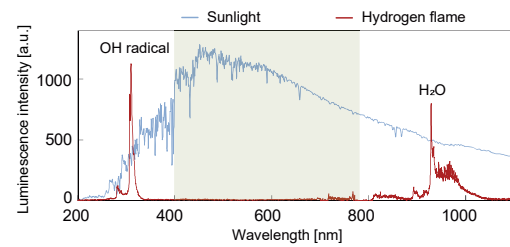


Fig.2 Spectrum of hydrogen flame and sunlight spectrum observed at the ground surface.

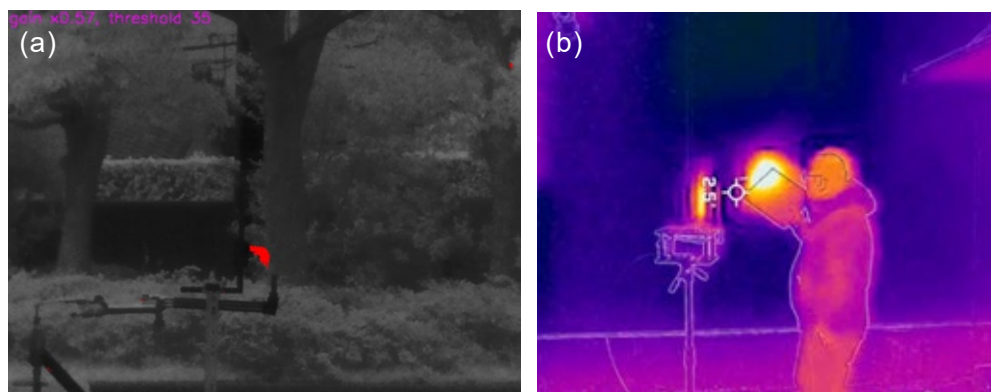


Fig.3 Hydrogen flame visualization. (a) Passive IR imaging (b) Thermal imaging

水素火炎も熱を持つため、Fig.3(b)のとおりサーマルイメージングでの撮像は原理的に可能である。しかし、炎の検出という点で競合する技術であるものの、サーマルイメージングの場合、視野内に映りこむ物質の熱領域も捉えてしまう。消火活動現場など高温の物体が多く存在する環境下で物体と水素火炎が重なっている場合、高温の熱領域が重なって認識されてしまい水素火炎の視認が困難となる。この点でパッシブ IR イメージングは優位性を持つ。

2.2 パッシブ IR ステレオイメージング

一般的なステレオイメージングは、ある特定の距離で置かれた 2 台のカメラを使ってターゲットを撮像し、視差による 2 台のカメラの撮像結果の違いによって物体までの距離を検出する手法であり、2 台のカメラを使った三角測量の一種である。一般的なステレオビジョンはハードターゲットを前提としており、水素火炎のような無色透明である物質に適用することはできない。

しかし、2.1 で示した通り、水素火炎は近赤外 2 波長で撮像した画像を合成処理することで可視化が可能であり、撮像に 4 台のカメラを用いることで、視差を持った 2 つの水素火炎の可視化画像が得られる。得られた 2 つの水素火炎の可視化画像にステレオイメージングを適用することで水素火炎の距離検出が可能となる。Fig.4 に示すパッシブ IR ステレオイメージングの模式図のとおり、本手法は 2 対 4 台のカメラにより水素火炎を測距する手法である。カメラ A、カメラ D では水素火炎の発光の強い 930 nm の波長領域を透過させるバンドパスフィルタを挿入し水素火炎を撮像する。カメラ B、カメラ C では水素火炎の発光の弱い 900 nm の波長領域を透過させるバンドパスフィルタを挿入し差分用の背景画像を撮像する。

カメラ A・B、カメラ C・D それぞれの画像を合成処理することで水素火炎の領域のみを取得した 2 つの画像が取得できる。カメラはそれぞれ既知の物理的な距離を持って配置されているため、画像の合成処理後に出力される 2 対の水素火炎の可視化画像間の距離 B も定められる。製作した装置での距離 B は 211 mm である。これにより、2 対の水素火炎の可視化画像と実際の水素火炎とを直線で結ぶ三角形が形成できるため、一般的なステレオイメージングと同様に水素火炎の測距が可能となる。

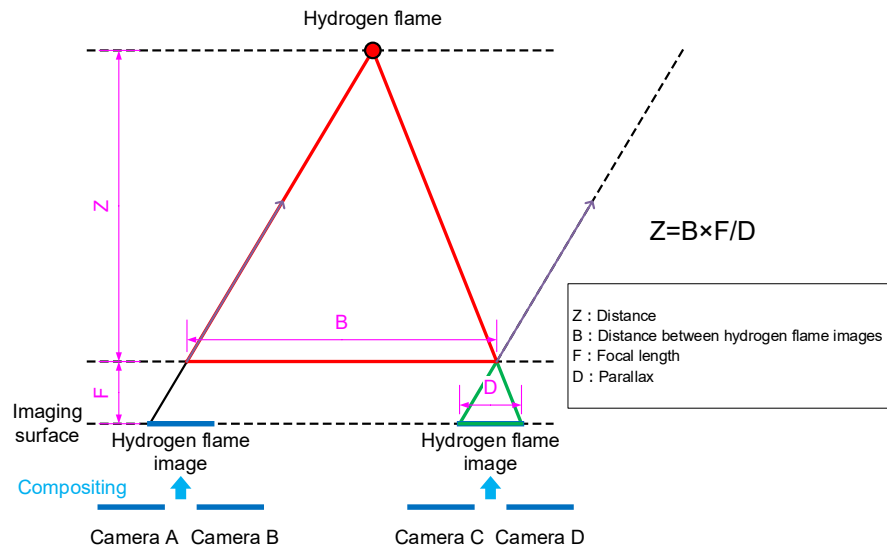


Fig.4 Schematic of passive IR stereo imaging for hydrogen flame visualization and ranging.

3. 装置構成

Fig.5 にパッシブ IR ステレオイメージングとウェアラブルデバイスを適用した水素火炎可視化装置を示す。



Fig.5 Equipment appearance.

本装置は水素火炎の可視化情報、及び水素火炎までの距離情報をウェアラブルデバイスに表示する。水素由来の火災現場を想定した場合、上記の情報を作業者が迅速に認識できる機能が保全設備には求められる。ウェアラブルデバイスを適用することにより水素火炎の早期視認、初期対応の迅速化が可能となる。

ウェアラブルデバイスの両側面には各2式、計4台のCMOS素子(IMX219: SONY)を操作に影響のない位置に配した。カメラレンズは直径φ12.5 mmの小径の近赤外用カメラレンズ(VH160D900: ユニバース光学工業)を適用し、波長選択を行う光学フィルタの直径もφ12.5 mmとした。それぞれ水素火炎撮像側のバンドパスフィルタ(930FS10-12.5: Andover)を、背景撮像側は(900FS10-12.5: Andover)を適用した。ウェアラブルデバイスには(Trimble XR10: Nikon Trimble)を適用した。Trimble XR10には現実世界に仮想世界を重ね合わせて体験できる技術である複合現実技術(Mixed Reality: MR)が用いられており、透過型ディスプレイを通して現実の視野内に仮想世界の情報を再現することが可能である。

加えて装置には透過型のウェアラブルデバイスの抱える屋外での表示の低視認性という問題点を解決するために調光レンズ(Trimble HoloTint: Nikon Trimble)を適用している。

4. 機能評価

製作した装置を用いて、水素火炎の可視化機能と測距機能を昼間屋外環境下にて確認した。水素火炎の火炎長は約 4 cm、離隔距離の設定は 3 m, 5 m, 7 m, 10 m である。Fig.6 に機能評価試験の結果を示す。

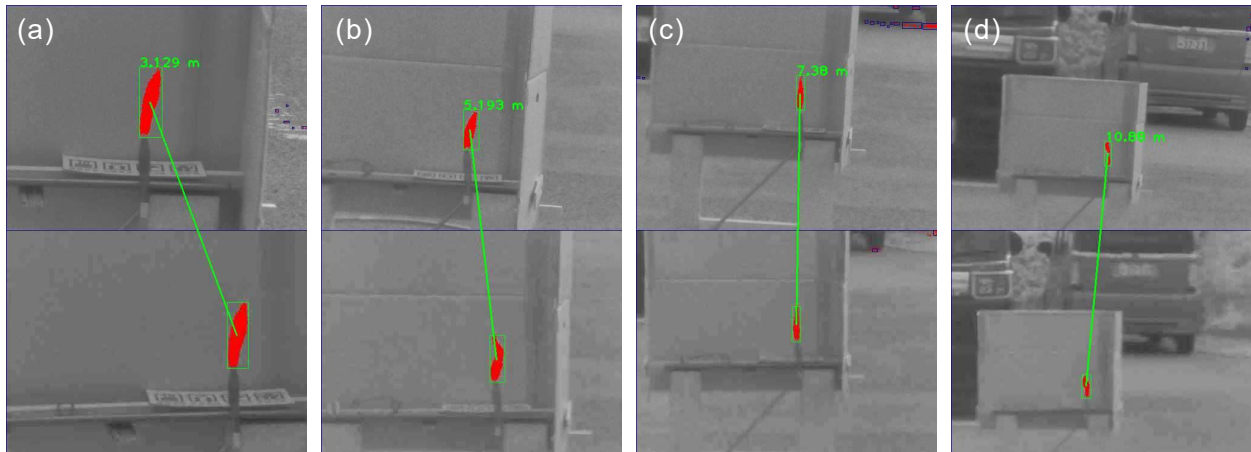


Fig.6 Results of hydrogen flame imaging and ranging. (a) 3 m (b) 5 m (c) 7 m (d) 10 m

Fig.6 は昼間屋外にて水素火炎の撮像と測距を行った結果であり、上図は装置右側面、下図は左側面側の水素火炎の可視化画像である。撮像結果より、周辺光量の減少なく明瞭に水素火炎、及び背景が撮像できた。測距結果はそれぞれ 3 m の場合 3.13 m、5 m の場合 5.19 m、7 m の場合 7.38 m、10 m の場合 10.89 m であり、10 m での撮像では 9% 程度の誤差がある結果となった。測距する火炎までの距離と火炎の揺らぎによる発光位置の変化がこの誤差に大きく影響していると考えられる。現場使用を想定した場合、作業員が危険源から迅速に離れることが最も重要であることから、製作した装置は現場使用に十分な測距性能を有していると考えられる。

5. まとめ

パッシブ IR ステレオイメージングとウェアラブルデバイスを適用した水素火炎可視化装置を開発し、機能評価を行い、水素火炎の可視化機能と測距機能を昼間屋外環境下にて確認した。今後は現場適用に向けて抽出した光学系の堅牢化や耐久性の向上などの課題の解決を進め事業化を目指す。

謝 辞

本研究開発の一部は、福岡県水素グリーン成長戦略会議令和 4 年度、5 年度製品開発支援事業として実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：「水素基本戦略」，pp.24-25 (2017).
- 2) 鈴木健吾：「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」，日本燃焼学会誌，Vol.61，No.195，pp.30-36 (2019).
- 3) 荻田将一，田中武海：「受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発」四国電力，四国電力送配電，四国総合研究所 研究期報 118，No.1，pp.11-19 (2023).
- 4) 福地哲生，二宮英樹：「OH 発光の差分画像計測による水素火炎の可視化」，電気学会論文 C，Vol.127，No.5，pp.692-698 (2007).
- 5) ASTM G 173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2. 9. 2.