

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | 熱赤外リモートセンシングによる分光放射輝度を用いた建築空間における気温分布の逆推定 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 鶴見隆太 |
| Author(English) | Ryuta Tsurumi |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第372号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪 貢史,山中 浩明,松岡 昌志,鍵 直樹,大風 翼 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第372号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 論文要旨 |
| Type(English) | Summary |

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論 文 要 旨 (和文2000字程度)

Dissertation Summary (approx. 2000 characters in Japanese)

| | | | |
|---|-------|-------------|------|
| 報告番号 For administrative use only | 乙 第 号 | 氏 名 Name | 鶴見隆太 |
| <p>(要 旨) (Summary)</p> <p>本論文は「熱赤外リモートセンシングによる分光放射輝度を用いた建築空間における気温分布の逆推定」と題し、以下の7章から構成した。</p> <p>1章「序論」では、まず建築分野において気温分布を遠隔から観測する実用的な手法は提案されていないこと、また人工衛星等からの気温分布の逆推定手法は建築スケールでの水平気温分布に対して実現可能かどうかは自明でないことを論じた。そこで本研究の目的として、建築空間において、熱赤外リモートセンシングにより観測した分光放射輝度を用いて気温分布を逆推定する可能性を明らかにすること、およびその適用条件を提示することとし、論文の構成を示した。</p> <p>2章「放射伝達過程の概要と観測方程式の定式化」では、放射伝達過程の概要を述べ、放射伝達方程式から分光放射計に入射するエネルギーである観測方程式を定式化した。また透過率の変化率とプランク関数の積が観測機に入射するエネルギーにおける空気からの寄与を表すことを示した。透過率の変化率を鉛直観測（人工衛星など）と水平観測の場合で比較した場合、水平観測においては分光放射計から離れるに伴い透過率の変化率が単調減少するため、鉛直観測よりも、遠方の気温の逆推定の難易度が高くなることを明らかにした。</p> <p>3章「気温分布の逆推定アルゴリズム」では、水平方向の気温分布の逆推定において最小二乗法が使用できないこと、およびその原因を示し、本研究で用いる逆推定アルゴリズムであるMaximum a Posteriori (MAP) 法を導入することを述べた。MAP法は観測前に気温について分かっている確率的な情報（事前情報）を用いて解を正則化させる方法であるが、MAP解の解釈には真値との誤差（本研究では、Root Mean Squared Error; RMSE）だけでは不十分なことを指摘し、事前情報からの影響を量的に把握する指標であるAveraging kernelを導入した。</p> <p>4章「放射伝達シミュレーションによる逆推定の感度解析」では放射伝達シミュレーションによって、建築スケールの気温分布逆推定の実現可能性やその特性に関して以下を明らかにした。(1) 建築スケールでも、MAP法を適用することで誤差の鋭敏性が問題にならず気温分布を推定できる。(2) 誤差の鋭敏性への対応という観点からは空間の離散化方法に関して過度に配慮する必要はないものの離散化を工夫することで、各層の観測からの寄与が同じになるように近づけることができ、これにより直感的に観測からの情報の多寡を判断できる。(3) 対象の距離に関して100 mと1000 mではほぼ同程度の推定精度が得られる。(4) 分光放射計の波長分解能を上げるとより観測からの情報が増える。特に半値幅 (FWHM) が1cm^{-1}の場合は全層に感度が確認できる理想的な状態となる。一方で観測の情報が増えたことにより、観測誤差の影響を強く受けるため、チャンネル選択などを行い、不必要なチャンネルを減らすことが必要である。(5) ランダム誤差が5%から10%に増える程度では大きな影響はない。一方で観測バイアスは大</p> | | | |

きな影響がある。(6) Jacobian作成時の水蒸気のバイアスに関しては逆推定に大きな影響がある。一方で二酸化炭素のバイアスは影響が小さく、水蒸気より二酸化炭素の波長帯の方が逆推定にとって良好な性質を有する。

5章「熱赤外分光放射計を用いた建築スケールの気温分布の逆推定実験」では、建築スケールの気温分布の逆推定の可能性を実験的に明らかにするために、ポータブル熱赤外分光放射計を用いて温度差のある2つの空間の気温分布を逆推定する実験を行った。まず放射伝達シミュレーションを用いて Jacobianを計算し、これと観測された放射輝度から気温分布を逆推定した。気温の逆推定に対する事前情報の影響を確認するために、事前情報の標準偏差を3 Kまたは5 Kに設定しケーススタディを実施した。全ケースの事前情報の平均 RMSE は 2.1 Kであったが、MAP解の平均RMSEは1.3 Kと、RMSEが38%減少した。事前分布の設定によらず全てのケースで観測前よりRMSEが減少したことを確認した。この分光放射計 (FWHM 約 30cm^{-1}) では空間5層の内、センサーに近い1層目には感度が見られたが、2層目以降は感度がみられなかった。したがって2層目以降で気温分布を再現できたのは、事前分布からの寄与が支配的であった。

次に6章「局所的なヒートソースがある空間での逆推定実験」では、より一般的な状況として観測パスの途中にヒートソースがある状況で気温分布を逆推定する実験を行った。局所的なヒートソースがある場合は事前情報の不確実性が高くなることが想定されるが、事前情報の標準偏差が15 Kまたは30 Kと5章に比べ大きい場合でも逆推定により誤差が低減されることを明らかにし、RMSEは全ケース平均で45%減少した。特にヒートソースの位置が事前に明らかな場合は、ヒートソースが第2層から第4層と分光放射計から離れた場所にある場合でも、MAP解はそのヒートソースの位置に感度があることを Averaging kernelを用いて確認した。

最後に7章「結論」では、各章で得られた知見と結果を総括して結論を述べるとともに、今後の課題を示した。

以上要するに、本論文は、建築空間における熱赤外リモートセンシングを用いた気温分布の逆推定の可能性をシミュレーション・実験を用いて定量的に示した。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論 文 要 旨 (英 文) (300語程度)

Dissertation Summary (approx. 300 words in English)

| | | | |
|---|-------|-------------|-------|
| 報告番号 For administrative use only | 乙 第 号 | 氏 名 Name | 鶴見 隆太 |
| <p>(要 旨) (Summary)</p> <p>The paper is divided into seven chapters. Chapter 1 discusses the lack of practical methods for remotely observing temperature distribution in built spaces and the feasibility of applying satellite-based techniques to building-scale horizontal temperature distributions. The study aims to determine the feasibility and conditions of using thermal infrared remote sensing for inverse estimation of temperature distribution in built spaces. Chapter 2 explains the radiative transfer process and formulates the observation equation. It discusses the increased difficulty of inverse temperature estimation for horizontal observations compared to vertical ones. Chapter 3 introduces the Maximum a Posteriori (MAP) method, which regularizes solutions using prior probabilistic information about temperature. The chapter also introduces the Averaging Kernel to quantify the influence of prior information. Chapter 4 shows sensitivity analysis of building-scale temperature distribution inverse estimation. The results show that temperature distribution can be estimated without solution instability. Increasing spectral resolution improves information from observations, but excess channels should be reduced to minimize observation error impact. Random have low impact, but observation biases significantly affect results. Chapter 5 describes an experiment using a portable thermal infrared spectroradiometer to estimate temperature distribution between two spaces with different temperatures. The study confirms that MAP reduces RMSE by 38% on average compared to prior information, although sensitivity was only observed in the nearest layer to the sensor. Chapter 6 extends the experiment to scenarios with local heat sources, showing that MAP can still reduce errors even with higher uncertainties in prior information. The study finds that MAP is sensitive to the position of heat sources even when they are distant from the spectroradiometer, if we know the location of the heat source in advance. Chapter 7 summarizes the findings and results and outlines future research directions. In summary, the paper shows the feasibility of using thermal infrared remote sensing for inverse estimation of temperature distribution in built spaces through simulations and experiments.</p> | | | |

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.