

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760327

研究課題名(和文)高出力レーザ用イメージングパワーメータの実現に向けたイメージセンサ校正技術の開発

研究課題名(英文) Development of calibration technique of image sensors toward realization of imaging power meter for high power lasers

研究代表者

沼田 孝之 (NUMATA, TAKAYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60420288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：イメージセンサを用いたレーザパワー測定技術の構築を目指し、イメージセンサの感度評価技術および高耐力光減衰技術を開発した。測定誤差要因となる画素間感度均一性について波長1064 nmと532 nmによる評価を行い、波長と露光時間への依存性を明らかにした。プリズム底面に発生させたエバネセント波の再結合特性を利用する光減衰器を開発し10 W、3 mmの高出力レーザに適用して-70 dB程度以上の減衰量を確認しつつ偏光依存性と減衰器透過前後におけるビームプロファイルを評価した。減衰器とイメージセンサを組み合わせたパワーメータを構築してレーザパワー測定実験により提案原理の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Responsivity evaluation technique of CCD image sensors and an optical attenuation method applicable for high power lasers were developed to realize an image sensor-based laser power meter. Investigation of pixel to pixel uniformity of responsivity of Si-CCD sensors revealed strong dependence on exposure time and laser wavelength. Proposed optical attenuator utilizing re-coupling of evanescent wave allowed attenuation of 10 W, 3 mm laser beam down below -70 dB being easily controllable with the gap between two prisms. Incident beam profile was saved through the strong attenuation process. The attenuator and sensitivity-evaluated CCD were assembled to construct the imaging power meter and applied to laser power measurement.

研究分野：レーザ放射計測

キーワード：レーザ 感度 プロファイラ CCD 近赤外 高出力 光減衰器 均一性

1. 研究開始当初の背景

レーザ加工の分野では加工現象を支配するビーム内のパワー密度を信頼性高く計測技術が求められていた。CCDやCMOS等のイメージセンサを用いたビーム診断装置(ビームプロファイラ)は有力なハードウェアと目されたが、これまで高出力レーザに適用可能な精密な光量調整技術やレーザビームの測定を想定したイメージセンサの感度評価技術がなく、これらの解決が課題となっていた。

2. 研究の目的

ビームプロファイラ用イメージセンサのレーザパワー感度評価技術と、高耐力レーザ減衰技術を開発する。これらを組み合わせてイメージセンサベースのレーザパワーメータを構築し、レーザパワーの既存のスケールとの比較測定を通して提案原理の妥当性や精度を検証する。提案原理の概略を図1に示す。従来、イメージセンサの感度評価は測光応用を目的として積分球をベースにした均一光源を用いたオーバーフィル条件下において主に視感度曲線近傍の波長範囲を対象として行われてきたが、レーザ応用においては、紫外～近赤外の広い波長範囲で指向性や強度、可干渉性が高いビームをアンダーフィル条件で測定する必要がある。そのため本研究では上記のような実用条件を重視し、特にビーム形状の正確な評価に不可欠な画素間の感度均一性や、レーザ加工分野で測定需要の高い波長 1 μm 付近の近赤外波長での感度特性に着目して開発を行った。

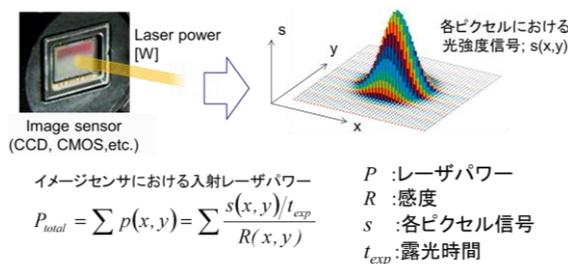


図1 イメージングパワーメータの概念

3. 研究の方法

(1) イメージセンサ感度評価技術の開発

単位光パワーの入射に対するイメージセンサの信号出力を測定することで評価する。理想的なTEM00モードで既知の光パワーを出射する標準光源を光ファイバで構築し、ファイバ出射ビームで、センサ表面近傍で面内走査する。光照射位置座標に対するセンサ信号を取得し、レーザスポットの局所領域毎に感度を評価する。光源の波長はレーザ加工分野で測定ニーズの高い1064 nmとし、走査中のパワー変動を監視、補正することで精度向上を図る。

(2) 高耐力レーザ減衰技術の開発

レーザ耐力を確保するには減衰器内部に

光吸収の無いことが重要となる。本研究ではプリズム底面に発生するエバネッセント波を別のプリズムに再結合させることで、透過率を制御する、非吸収型の減衰システムを開発する。プリズム間距離の制御にはピエゾ素子もしくはスペーサを用い、偏光依存性や透過ビーム形状の保存性ととも減衰量(透過率)を定量評価する。また10 Wレベルの高パワーレーザに対する減衰量の安定性を評価する。

(3) レーザパワー測定精度評価

感度特性を評価したイメージセンサを光減衰器と組み合わせ「イメージングパワーメータ」を構築してレーザパワー測定実験を行う。既存スケールとの比較を通して提案手法の妥当性を検証する。また測定手法の精度と誤差要因を評価し、現場での活用・実用化に向けた技術課題を整理する。

4. 研究成果

イメージセンサ感度評価ではまず、感度校正用ファイバ光源の構築に取り組んだ。実験用レーザ光源の空間ビームを対物レンズでシングルモード(SM)光ファイバに結合し、分岐カプラで分配して一方のファイバ出射端を校正用光源として、他方をパワー変動の監視用として使用するシステムを開発した。SMファイバから出射光でセンサ表面の局所領域をスポット照射したところ、画素が飽和しない光強度レベルであるにも関わらず電荷転送方向に沿ってスミア状のノイズが発生しSMファイバを出射するTEM00のビームスポットの検出像に歪が生じることがわかった。ビームサイズやパワー密度の評価における測定誤差につながるため詳細な評価を進め、歪のセンサの露光時間への依存性(図2a)、ならびにHe-Neレーザ(波長633 nm)を用いた実験を通してその波長依存性を明らかにした(図2b)。

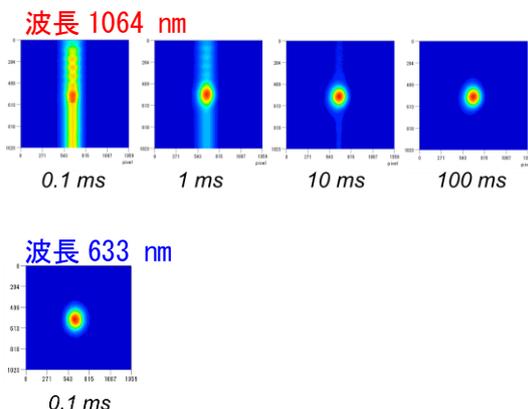


図2a 波長および露光時間依存性の像ノイズ

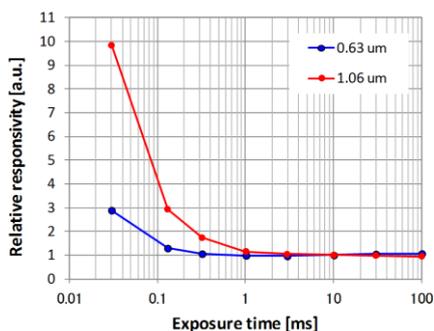


図 2b 歪ノイズ露光時間依存性

一方、光ファイバ出射パワーの絶対値を用いた感度評価については、実験用レーザー光源のポイントスタビリティの影響から光ファイバへの結合効率の安定性に問題があり十分な評価精度の確保が困難であった。そこで計画を変更し、センサ感度評価では既知の光パワーで安定化した集束ビームを照射することとし、センサ画素間の感度不均一性は、別途積分球を用いた均一光源を用いて開発を進めた。

積分球光源では、出力安定化した波長 1064 nm および 532 nm のレーザー光を、スペックル除去のための加振ミラーを通して球内に導入し、直径 3 インチの出力ポート近傍に均一な放射照度場を形成させた (図 3a)。均一性は前面にピンホールを取り付けたフォトディテクタを面内で走査することで評価し、ポート近傍の光軸に垂直な  $\square 20 \text{ mm}$  の領域で、ばらつき  $\pm 0.1\%$  が得られた (図 3b)。この位置に評価対象のイメージセンサを設置することで画素間の感度分布を評価できる。本研究では 3 台の Si-CCD 型と 1 台の CMOS 型ビームプロファイラに対して実験を行い感度均一性と、その波長依存性、露光時間依存性、および各機差を評価した。

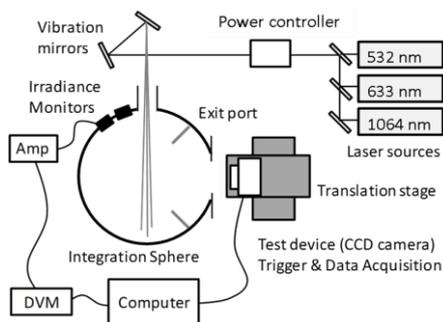


図 3a 均一性評価システム

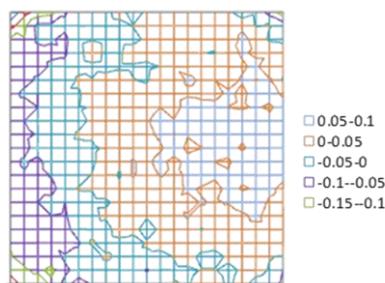


図 3b 波長 1064 nm 均一放射照度場 [%]

光軸上にセンサを設置し、露光時間を変えつつ A/D 変換のダイナミックレンジの 50 % となる平均信号強度が得られるレベルに照度を調整し波長毎に画像を取得する。露光時間は 0.1 ms、1 ms、10 ms、100 ms とした。図 4 に結果を示す。

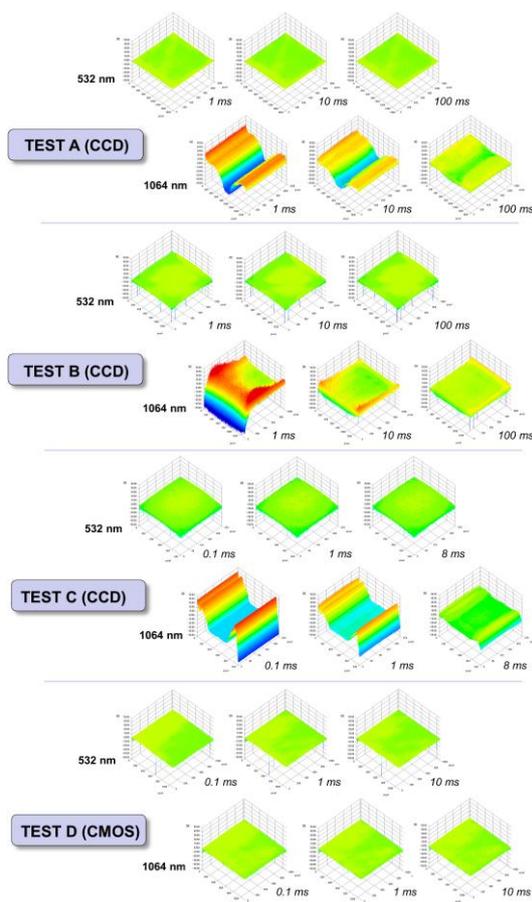


図 4 Si ベースイメージセンサの画素間感度均一性

Si のバンドギャップよりも短波長側の 532 nm においてはいずれのセンサも感度均一性が得られる一方、長波長側の 1064 nm においては、露光時間に依存し大きな感度不均一性

が現れることが分かった。特に露光時間の短い場合に不均一性が顕著となりその感度分布はセンサによって異なること、またこれらの特性は露光時間の延長により軽減されることが明らかとなった。さらに CMOS 型センサにおいては 1064 nm でも不均一性の増大が見られなかった。CCD 型と CMOS 型の違いである光励起した電子の転送機構の有無に着目し感度不均一性の発生メカニズムの考察を行った。その結果、①近赤外光は Si 吸収係数が小さく吸収長が伸びることでセンサの厚さ方向の製造ムラなど構造的な不均一性が信号に現れやすい、②同様な理由で可視光と異なる場所で光電子が発生するため CCD の電子回収機能が低下し、転送路にも光励起電子が紛れ込むことでノイズとなる、③画像における S/N は露光時間（電子シャッタ）とフレームレートの割合で決定づけられ、露光時間が短くなることでノイズ側が顕著になることで発生する、等が要因と考察した。

これらの感度不均一性は、実際のレーザービーム診断を想定したアンダーフィル条件での微小スポット走査による結果でも再現することを確認した。ビームプロファイルの正確な評価は、イメージセンサの感度均一性の確保が前提となる。特に Si ベースのセンサを近赤外波長のレーザービーム診断に適用する場合は、慎重な妥当性の検証評価が求められることが分かった。

以上の成果より、近赤外波長における感度均一性低下を防ぐには十分な露光時間の確保が重要であり、高出力レーザー測定においてはイメージセンサ入射前でのレーザー光の十分な減衰が不可欠といえる。しかしながら現在普及している反射型や吸収型の減衰装置では多段の減衰過程で光路長が伸び、機材が大型化したり、各減衰素子間での光の干渉や熱レンズ効果等により被測定ビームの形状が乱されビームプロファイルの正確な評価を妨げる原因となっている。そこで本研究ではこれらを解決する手法として二つの直角プリズムを組み合わせた減衰素子を提案し開発を進めた。

研究ではまず減衰特性の基礎評価のためピエゾステージ上に底面を向い合せて2つのプリズムを固定しアライメントした(図5a)。すべての脚面には無反射コーティングを施した。ここで一方のプリズム脚面に垂直に1064 nm のレーザー光を入射させると底面で全反射しその近傍にエバネッセント波が発生する。この光強度は底面から法線方向へ距離に従って指数関数的に減衰する非伝搬光であるが、これを対向させたもう一つのプリズム底面に結合させることで再度伝搬光に変換し脚面から取り出せる。このとき減衰量はプリズム底面間の間隙の大きさによって制御でき原理的には無限大に設定可能である。図5bに、出力10 W、ビームφ3 mmのレーザー光の減衰後のビームプロファイルを示す。およそ-70 dB超の光減衰量について従来複数の

ガラス基板や ND 吸収フィルタ等の組み合わせで作出すところを、本提案手法では厚さ25 mm 程度のインラインのコンパクトな素子一つで実現しており、その過程でビーム形状も保存していることが確認できた。偏光依存性の評価を行い、エバネッセント波の浸み出し長に由来する減衰特性を確認した。図5cに、金属箔をスペーサとしイメージセンサ前段へ取り付け可能とした試作機を示す。

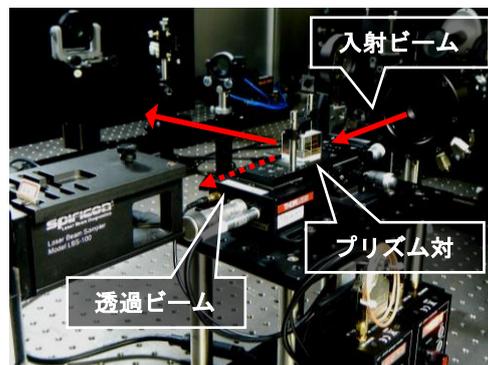


図 5a 減衰器特性評価装置

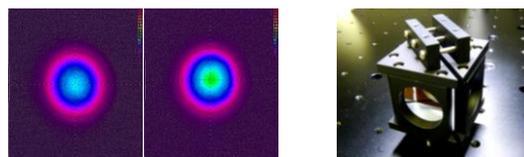


図 5b 従来型 (左)、プリズム型 (右) 減衰法を適用したビームプロファイル

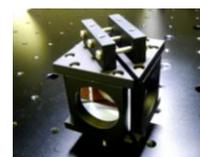


図 5c 試作機

イメージングセンサの感度評価は、国家標準にトレーサブルな既知のパワーの TEM00 モードの空間ビーム (波長 1064 nm) を、減衰量-40 dB の光減衰器を前段に設置した CCD センサにアンダーフィル条件で照射し、出力されるカウント値を測定することで行った。入射光強度は画素の飽和を避けるため A/D 変換ダイナミックレンジの 80 %以下になるよう設定し、露光時間は面内の感度均一性を考慮しつつ 10 ms とした。単位レーザーパワー当たりの各画素のカウント値を全画素で総和して取得する。結果、実験に用いた市販の 12 bit、130 万画素センサのビームプロファイルについて  $9.3 \times 10^7$  counts/mW を得た。これより、ビーム内のパワー密度は画素サイズとカウント値から、またトータルのパワーは全画素カウントの総和から見積もることが出来る。センサ信号出力の安定性は、室温の変化が無視できる短時間の測定においては入射レーザーパワーの安定性と等価なレベルである 0.1 %以下に抑えられた。

一方、温度依存性の誤差要因は、環境温度の異なる条件下で行った校正値から 2 %/°C 程度と見積もられた (図 6)。また、アンダーフィル条件でのレーザービームの測定では、セ

ンサ面内の画素間感度不均一性は、ビーム照射位置やビームプロファイルに依存した測定誤差を招く。そのため、精度の確保には感度校正時と測定時の照射条件の整合が重要となる。これらを鑑みつつ、従来型パワーメータとの比較測定により感度校正値の妥当性検証を行った。波長は 1064 nm、ビームサイズ  $\phi 2$  mm、誤差要因の排除のためイメージセンサへの照射位置、入射角のアライメントおよび環境温度、露光時間は感度校正の条件と一致させた。その結果、誤差要因評価に基づく不確かさの範囲で両者のパワー測定値の整合を確認した。

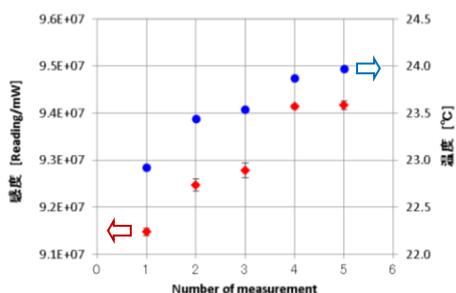


図 6 イメージングパワーメータ感度の温度依存性評価

以上、本研究ではレーザ加工の現場で測定需要の高い近赤外波長の高出力レーザにおけるビームパワー密度の定量評価を目指し、レーザ測定用 CCD イメージセンサの感度評価技術とレーザ光減衰技術の開発に取り組んだ。これらを元にイメージセンサベースのパワーメータを構築し従来スケールとの整合を評価することで提案原理の妥当性を検証した。同時に、開発の過程で Si ベースのイメージセンサ型ビームプロファイラに関する、センサ面内の画素間感度不均一性、露光時間依存性、波長依存性など、レーザビーム診断やパワー密度評価の信頼性確保に不可欠となる技術的知見を得ることができた。

## 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Numata, M. Tanabe, K. Amemiya, D. Fukuda, T. Zama : Characterization of CCD detectors for Laser Power Measurement, Proceedings of NEWRAD2014, 査読無, 2014, 279-280.
- ② T. Numata : Towards Realization of Imaging Power Meter ~Radiometric calibration of CCD camera based beam profilers, Proceeding of LAMP2013, 査読無, 2013, 13-094-A058, 1-4.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 沼田孝之、田辺稔、雨宮邦招、福田大治 : 近赤外波長におけるビーム診断用イメージセンサの感度不均一性、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 19 日、北海道大学・札幌
- ② 沼田孝之 : 産総研における高出力レベルレーザ標準の研究展開、光放射計測クラブ第 9 回会合、2014 年 2 月 25 日、産総研・東京
- ③ 沼田孝之 : CCD 型ビームプロファイラにおける近赤外レーザ光の検出感度特性、計量標準総合センター2012年度成果発表会、2013 年 1 月 24 日、産総研・つくば

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沼田 孝之 (NUMATA TAKAYUKI)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門  
主任研究員  
研究者番号 : 60420288