

Application Note

400nm までの波長で TI DLP® テクノロジーを使用する際のシステム設計上の考慮事項



Benjamin Lee

概要

ダイレクト イメージング リソグラフィ、3D プリンティングおよびその他のシステムでは、可視光スペクトルのディープ ブルー領域に最適化された光反応性材料がよく使用されます。本アプリケーション レポートでは、400nm までの動作が規定された TI DLP® デジタル マイクロミラー デバイス (DMD) を使用する際の、熱特性、デューティ サイクル、一般的な光学特性、コヒーレンシー、および高縮小率設計に関する考慮事項について検討します。

目次

1 はじめに.....	2
2 熱に関する注意事項.....	3
3 デューティ サイクルに関する考慮事項.....	3
4 コヒーレンシーに関する考慮事項.....	4
5 光学的な考慮事項.....	4
6 高倍率縮小システムの考慮事項.....	5
6.1 非コヒーレント 光源 (ランプおよび LED).....	6
6.2 コヒーレント光源 (レーザー).....	9
7 まとめ.....	11
8 参考資料.....	11
9 改訂履歴.....	11

図の一覧

図 1-1. 電磁スペクトルにおける可視スペクトル部分.....	2
図 6-1. 一般的なプロジェクション システム光学系.....	5
図 6-2. 投影レンズ入射瞳における光分布.....	6
図 6-3. 小型出力開口.....	7
図 6-4. チルト変動による反射照明の移動.....	7
図 6-5. DMD 出力開口径対倍率縮小率.....	8
図 6-6. コヒーレント照明による回折次数.....	9
図 6-7. 拡大された出力開口による 5 つの回折次数の捕捉.....	10

商標

DLP® is a registered trademark of Texas Instruments.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

紫外線 (UV) と可視光の境界線は、一般的に **400nm** とされています。波長と光子エネルギーの関係は、 $E = (hc/\lambda)$ によって表されます。ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は光の波長を示します。

この式は、分子の 2 つの値が定数であるため、光子エネルギーが波長の逆数のみに依存することを示しています。波長が短いほど、各光子が持つエネルギーは高くなります。したがって、**400nm** の境界に近い深青色光は、可視スペクトルの他の領域の光よりも、各光子あたりのエネルギーが大きくなります。

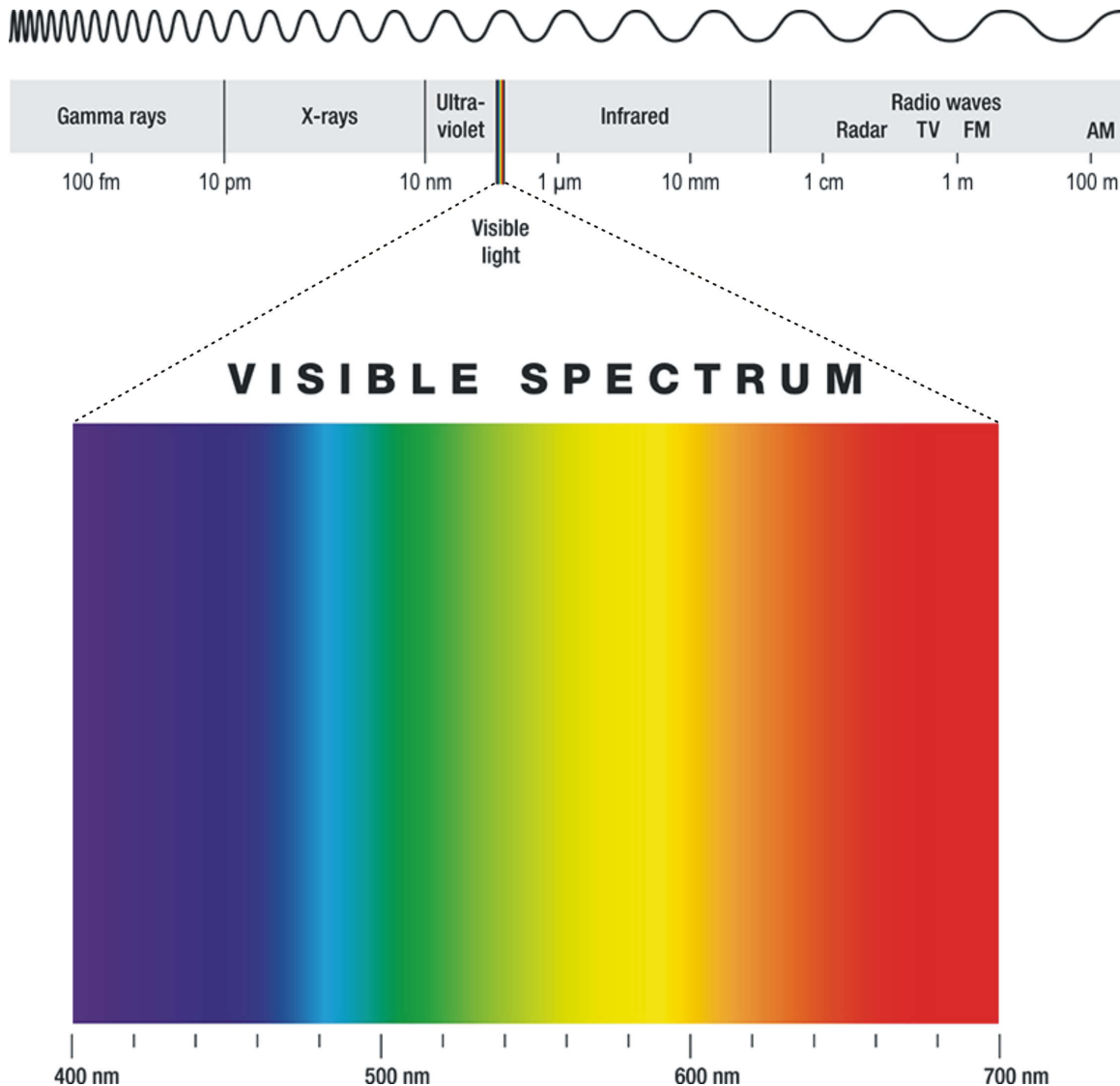


図 1-1. 電磁スペクトルにおける可視スペクトル部分

注

高エネルギーは左側から示され、右側に向かってエネルギーが低くなります。

高い光子エネルギーの恩恵を受ける応用例としては、直接描画リソグラフィーや一部の **3D** プリント方式があります。前者は一般的に「フォトレジスト」と呼ばれる感光性乳剤を用い、後者は光重合性樹脂を使用します。一般に、フォトレジストや樹脂材料はより高い光子エネルギーに対して反応性が高く、その結果、硬化速度が速くなります。

400nm までの動作が指定されたデジタル マイクロミラー デバイス (DMD) には、卓越した設計技術が採用されています。例として、DLP7000BFLP、DLP9500BFLN、DLP6500BFLQ、DLP9000BFLS、DLP9000XBFLS があります。特に、**405nm** の光はこの種の DMD で使用可能です。この波長の発光ダイオード (LED) およびレーザー ダイオードは、現在

手頃な価格で容易に入手可能であり、405nm 最適化材料を使用するシステムにおいて魅力的な選択肢となっています。

TI の DLP® DMD は、2 つの物理的状態を切り替える反射型マイクロミラーを用いて光を変調します。DMD の主要な変調制御がアルミニウム製マイクロミラーの反射によるため、これらのデバイスは有機分子を用いて変調制御を行う他の空間光変調器 (SLM) 技術に比べて、より短波長 (高エネルギー光子) に対して著しく高い耐性を持ちます。これは、有機分子がこれらの短波長光にさらされると劣化しやすいためです Ref 1,2。

しかし、リソグラフィや 3D プリント システムに最適なより短波長 の高エネルギー光子を DMD と併用する場合は、設計上の考慮事項により一層の注意が必要です。本アプリケーション ノートでは重要な設計上の考慮事項について詳述しています。

2 熱に関する注意事項

タイプ A DMD デバイスはより短波長で動作可能であるものの、これらのデバイスが影響を完全に受けないわけではありません。DMD アレイの温度は、スペクトルのディープ ブルー領域、すなわち 400nm 付近で動作する際に重要な要素となります。

DMD アレイの温度は 20~25°C の範囲で、かつ 30°C を下回るように保つことが望ましく、これはパッシブ冷却やサーモエレクトリック クーラー (TEC) などのアクティブ冷却によって達成可能です。タイプ A DMD においては、パッケージ内の任意の 2 点間、またはパッケージの任意の点と DMD アレイ間で 10°C を超える温度勾配が生じないように注意を払う必要があります。

データシートで定められた仕様内で温度および熱勾配を維持することは、より高エネルギー光子を用いる際の DMD の最適な性能発揮に寄与します。

TI には、パルス光源を含むデジタル マイクロミラー デバイスの熱的注意事項について詳細に解説した優れた [アプリケーション ノート「パルス光源を含むデジタル マイクロミラー デバイスの熱に関する考察」](#)があります。

3 デューティ サイクルに関する考慮事項

すべてのアプリケーションは DMD を約 50% のオン/オフ ランド デューティ サイクル付近で動作させることの恩恵を受けますが、この考慮は短波長領域および高温動作時により重要となります。ランド オン/ランド オフのデューティ サイクルは、個々のマイクロミラーがオン状態にある時間の割合とオフ状態にある時間の割合を示します。状態間の切り替え時間は無視できるものとみなされ、デューティ サイクルの算出時には考慮されません。

DMD のデューティ サイクルは、ランド オンの割合/ランド オフの割合として表されます。例えば、75% の時間オンで 25% の時間オフのピクセルは「75/25」と表記されます。この 2 つの数字は常に合計で 100 になることに注意してください。

50/50 前後での動作は、DMD の最長寿命を促進します。この考慮の下での動作シナリオは 2 つ考えられます。

1 つ目のシナリオは、ピクセルの履歴が不明または追跡されていない場合です。DMD が能動的に照明されていないとき⁽¹⁾、常に 50/50 で動作させることで、平均値を 50/50 に近づけることが可能です。静止期間中に 50/50 で動作する時間が長くなるほど、全体の平均値は 50/50 に近づきます。

注

製造面で DMD パターンが不要または使用されていない場合は、照明をシャッター (またはオフ) してください。DMD を主要な照明シャッターとして使用せず、機械式シャッターなど光源側でシャッターを制御してください。

2 つ目のシナリオは、各ピクセルの履歴が追跡されている場合です。この場合、ピクセルはパターンニングに積極的に使用されていない期間に逆のデューティ サイクルで同じ時間だけ動作させ、その後 50/50 で動作させることが可能です。例えば、ピクセルが稼働中に 4 時間 62/38 で駆動された場合、静止期間中に 4 時間 38/62 で駆動することで平均は 50/50⁽²⁾ になります。

注

50/50 の平均値は単純化した概念であり、実際には動作中に照明が当たることでピクセルが加熱され、照明がオフのときにピクセルが冷却されるという違いがあります。高フルエンス システムでは、残留チルトを平坦に戻すために逆のデューティ サイクルをどれだけ長く運用すべきか、あるいは逆サイクルにどの程度の重みを付けるべきかを実験的に検証する必要があります。

4 コヒーレンシーに関する考慮事項

DMD にコヒーレントでコリメートされた狭帯域光を照射すると、反射光は回折次数と呼ばれる 2 次元の斑点パターンとなります。ブレイズまたはアンチブレイズの状態は、ピクセル ピッチ、DMD マイクロミラーの傾斜角、照明波長、および入射光の角度に応じて発生します。

ブレイズ状態とは、回折パターン全体のほとんどのエネルギーが 1 つの回折次数に集中する場合を指します。モデリングによると、この次数は出力エネルギーのほぼ 4 分の 3 を占め、残りの 4 分の 1 は他のすべての次数に分散されます。

アンチブレイズ状態とは、回折パターン内で最も明るい 4 つの回折次数がほぼ同等のエネルギーを持つ場合を指します。モデリングによると、これら 4 つの隣接する回折次数はそれぞれ出力エネルギーの約 6 分の 1 (合計で約 3 分の 2) を占め、残りの 3 分の 1 は他のすべての次数に分散されます。

基本的な DMD の回折については、ホワイトペーパー「[DLP® DMD テクノロジーによるレーザーの使用](#)」でより詳しく解説されています。

個々のマイクロミラー間の最大許容傾斜変動は $\pm 1^\circ$ と規定されています。約 400nm 付近では、この傾斜角の差により、顧客はアンチブレイズからブレイズまでのいずれの状態の DMD を受け取る可能性があります。したがって、システムの出光光学系は、少なくともアンチブレイズ状態における最も明るい 4 つの回折次数を収集できる十分な開口径を備えている必要があります。例えば、405nm では、ピッチ 7.56 μ m のデバイスに対して、少なくとも直径 4.4° の角度開口が必要です。直径を 6.2° に拡大することで、4~5 回の回折次数を捕捉できるようになり、これは推奨されています。

さらに、システム設計においては、公称入射角から $\pm 2^\circ$ の調整が可能な照明調整機構の採用も推奨されます。通常、照明コーンは窓面法線から 24° の角度を中心に配置されており、これにより 12° 傾斜角のデバイスでは出力コーンが DMD の法線方向に中心を持ちます。 $\pm 2^\circ$ の調整により、405nm 付近の波長において最も明るい回折次数を出力開口内に移動させることが可能となります。

5 光学的な考慮事項

1 対 1 以上の倍率を持つシステムでは、出力瞳をややアンダーフィルすることで光学系におけるチルト変動の許容度が向上するため、 f 数を $f/2.4$ まで小さく設計することが実用的かつ望ましい照明および出力光学系の設計となります。例えば、 $f/3$ の照明を $f/2.4$ の出力に対して行うことで、照明瞳の像がチルト角の変動に対しても出力開口内に収まるようになります。

一般的な DLP 光学系の考慮事項は、ツール「[DLP® 光学設計ガイドライン](#)」にて解説されています。本アプリケーションノート以下のセクションでは、高倍率縮小システムに関する考慮事項を検討します。

6 高倍率縮小システムの考慮事項

DLP テクノロジーを採用したコンシューマ プロジェクション システムでは、通常 図 6-1 に示される照明設計を用います。

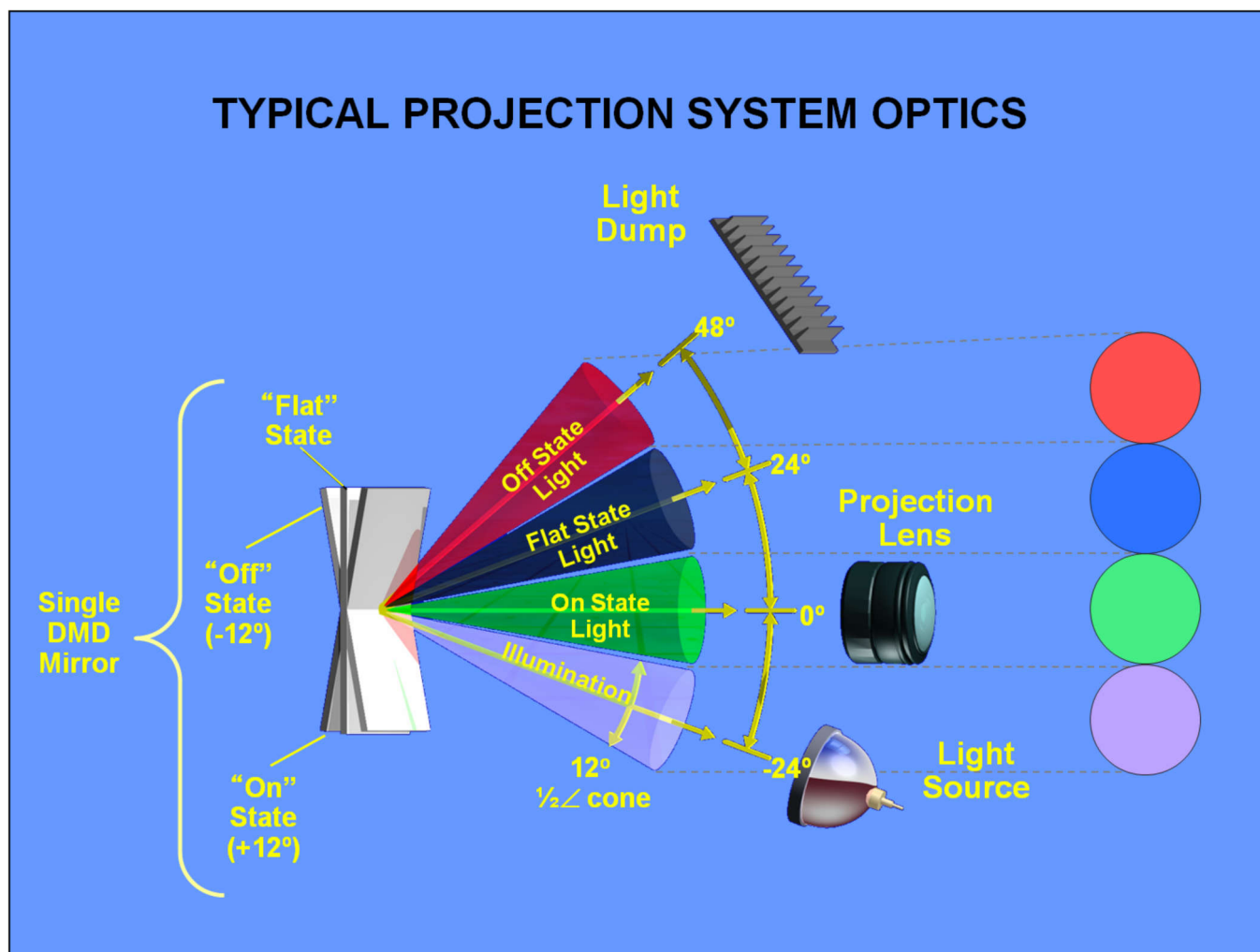


図 6-1. 一般的なプロジェクション システム光学系

しかし、一部のリソグラフィーおよび 3D プリント システムでは、DMD アレイ像を倍率縮小して、 $1\mu\text{m}$ 程度の非常に小さな微細構造に対応することが可能です。図 6-2 は、従来のプロジェクション光学系に対するこれらのシステムの小型出力開口の大きさを示しています。

Typical Projection System vs Small Aperture System

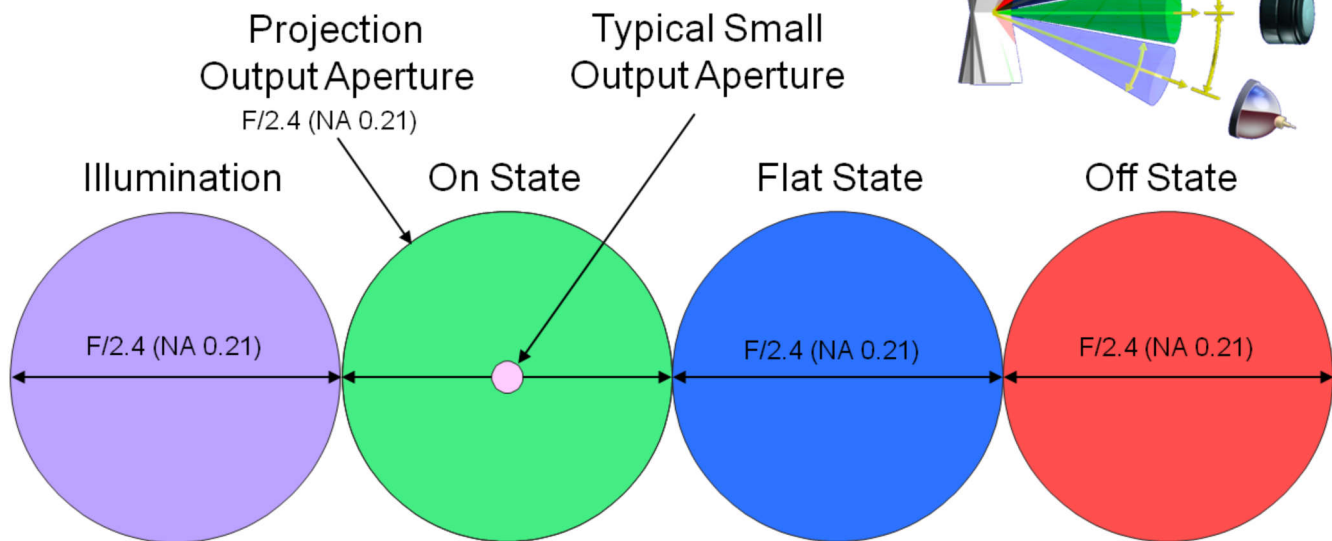


図 6-2. 投影レンズ入射瞳における光分布

これら比較的小型の開口に対する考慮事項は、非コヒーレント光源とコヒーレント光源の 2 つの分野に分けられます。

6.1 非コヒーレント 光源 (ランプおよび LED)

照明バンドル (光の円錐) のサイズを DMD 出力バンドルに合わせた広帯域および LED 光源の場合、マイクロミラーのチルト変動により一部の光が側面に漏れたり、出力開口を完全に満たさないことがあります (図 6-3 に示す)。これにより、出力輝度の望ましくない損失が生じます。

注

DMD を非コヒーレント光源と併用する場合、400nm 以下の波長をほぼ完全に遮断するフィルタを DMD への照明経路に設ける必要があることに注意してください (各 DMD のデータシート仕様を参照)。一部の LED は 400nm 以下の波長成分がほとんど含まれていないため、フィルターを必要としない場合があります。

ZOOM in to Small Output Aperture

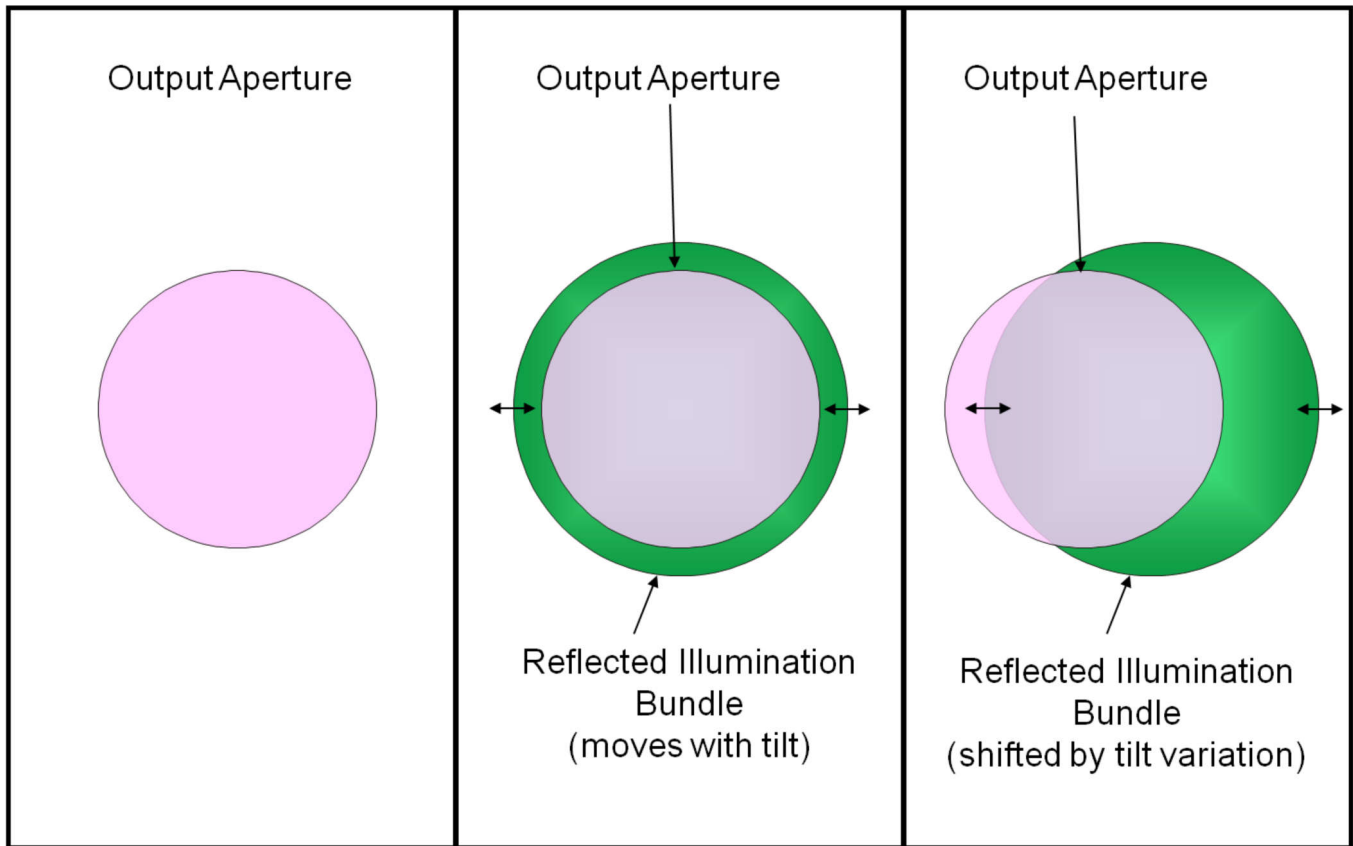


図 6-3. 小型出力開口

マイクロミラーのチルト変動に対する許容度を持ちつつ全光を捕捉する最適な方法は、照明バンドルを出力開口よりも小さく設計することです。これにより、図 6-4 に示されるようにすべての光を捕捉できます：

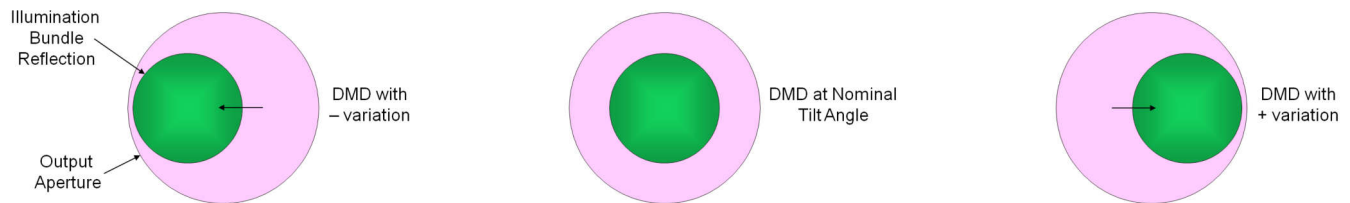


図 6-4. チルト変動による反射照明の移動

チルト変動の仕様は $\pm 1^\circ$ です。出力開口部では、反射した照明がこの角度の 2 倍、すなわち $\pm 2^\circ$ 移動します。これは反射光線が反射面の角度変動の 2 倍の角度で動くためです。出力開口は、この範囲 (-2° から $+2^\circ$) をカバーするために、照明バンドルより直径で 4° 大きく設計することが推奨されます。

したがって、 4° の許容範囲を確保するために達成可能な最大の f 数 (最小の開口径) には実効的な制限が存在します。照明の角度範囲 (数値開口数 (NA)) が非常に小さい場合でも、開口部は $f/14.3$ 相当であり、これは角度直径 4° の円錐に相当します。

この許容範囲内で達成可能な縮小率には 実用的な限界があります。 f 数が 1 未満の光学系は非常に製作が難しいです。 $f/1$ を限界とすると、最大倍率縮小率は 13 倍となります。図 6-5 のグラフには 2 つの曲線が示されています。マゼンタの曲線は、製造面で $f/1$ の円錐光束となる DMD 出力開口における円錐の角度直径を示しています。グリーン

は、照明バンドルと出力開口の間に 4° のマージンを維持する許容照明バンドルの角度直径を示しています。許容される照明円錐の直径は、13 倍を超える倍率縮小直後にゼロになることに注意してください。

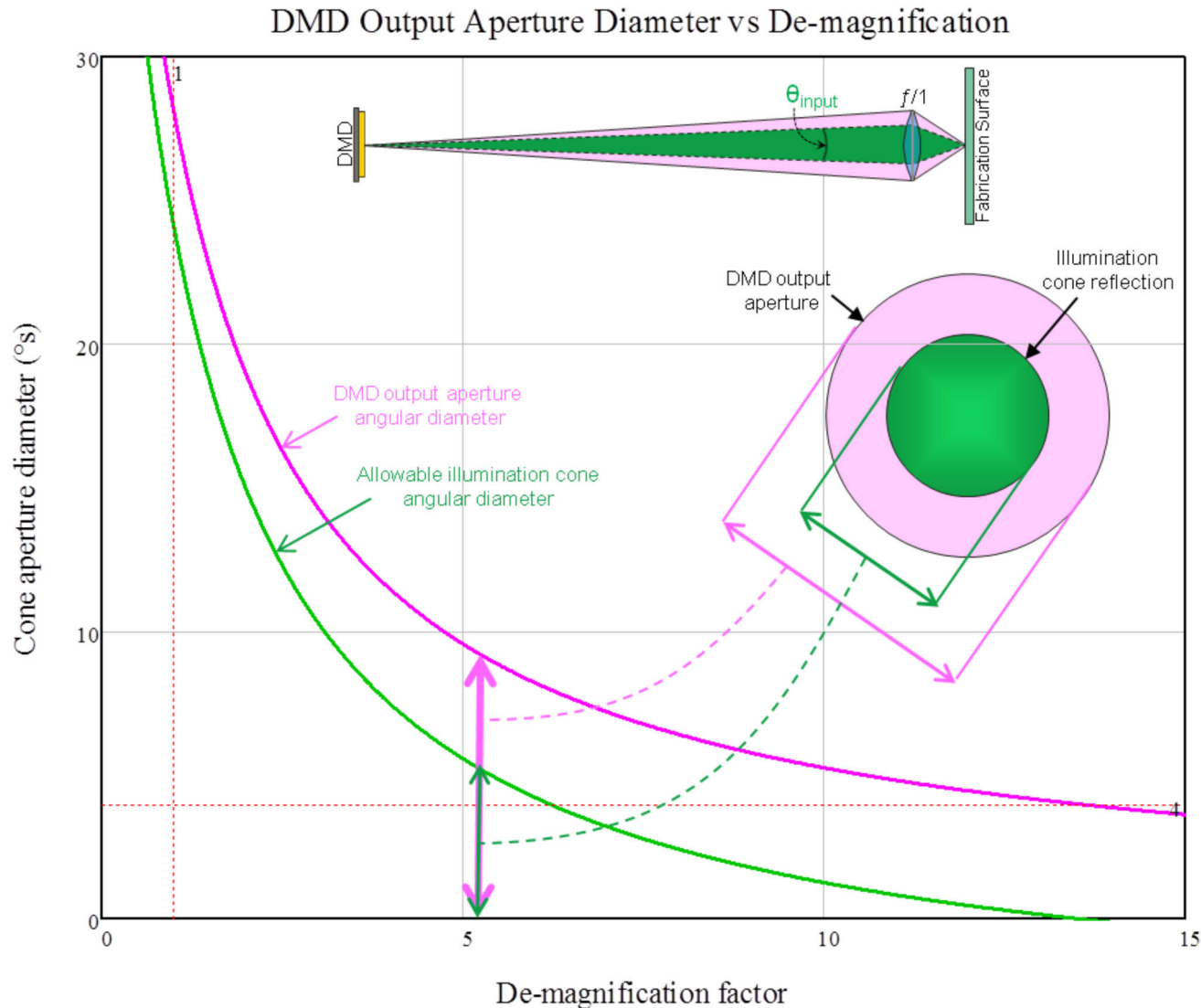


図 6-5. DMD 出力開口径対倍率縮小率

与えられた f 数に対する最大達成可能倍率縮小率は、概ね次式で表されます。

$$\frac{\cot\left(\frac{\theta_{\text{input}} + 4^\circ}{2}\right)}{2f} - 1$$

ここで、 θ_{input} は入力照明バンドルの角度範囲を示します。

まとめると、非コヒーレント光源は高倍率縮小システムで使用する際に 2 つの制限があります。出力側は $f/14.3$ 以下の f 数で、倍率縮小率は 13 倍以下にすることが推奨されます。実際には、照明ビームの角度直径を数度に保つ必要があり、これにより開口部のマージンを確保するか、より低い縮小率を選択することが可能となります。

6.2 コヒーレント光源 (レーザー)

コヒーレント光源は追加の課題をもたらします。単一の均質な光束ではなく、前述のように出力は回折次数に制限されます。これらの回折次数は入力光束と同じ角度範囲を持ちます。したがって、ほぼ角度範囲を持たないコリメート光束は、コリメートした回折次数をもたらします。

出力開口はこれら回折次数のいくつかを受け取ります。角度直径が λ/d (ここで d は DMD のピクセル ピッチ) より小さい場合、図 6 のパネルに示されるように、出力開口で捕捉できる回折次数は 1 つだけとなります。

入射照明角度が固定されている場合、チルト角の変動は回折次数の移動を引き起こさないものの、回折次数間のエネルギー分布のシフトを引き起こします。したがって、捕捉された回折次数がブレイズ条件に近い場合は、利用可能なエネルギーのほとんどがこの 1 つの回折次数に捕捉されますが、アンチブレイズ点に近い場合は、この小型開口では出力のごく一部しか捕捉できません。これを図 6-6 に示します。

ZOOM in to Small Output Aperture

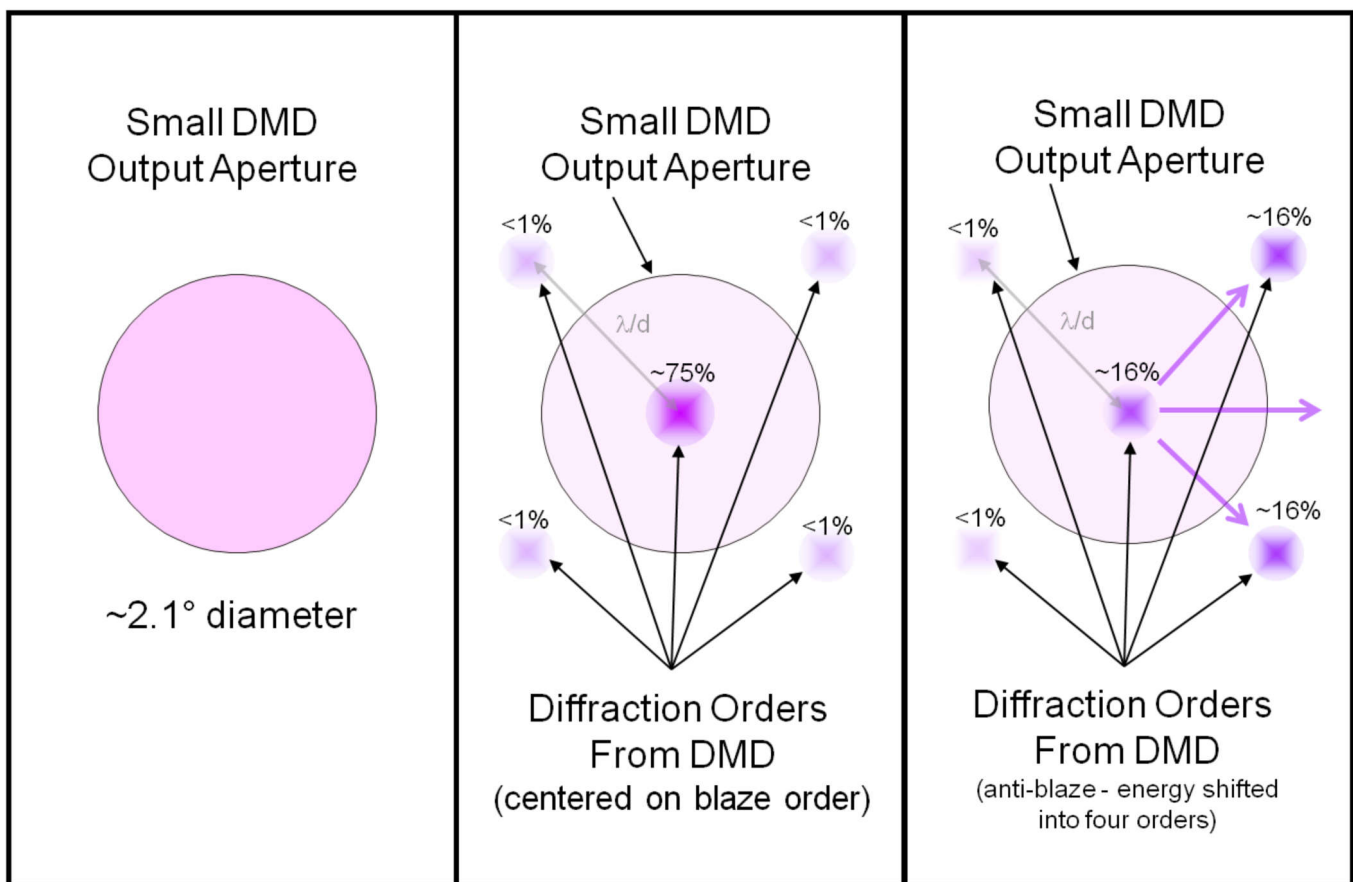


図 6-6. コヒーレント照明による回折次数

システム設計における許容度を確保するため、TI は出力開口を拡大し、図 6-7 に示すように 4~5 回の回折次数を捕捉することを推奨しています。前述の例に従うと、ピクセル ピッチが $7.56\mu\text{m}$ の DMD に対し、 405nm のコリメート光を照射した場合、約 4.4° の最小角度直径で 1 つまたは 4 つの回折次数を捕捉し、 6.2° では 4 つまたは 5 つの回折次数を捕捉します。推奨される最小角度直径は以下の式で示されます：

$$2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} \right) + \theta_{\text{input}}$$

ここで、 θ_{input} は入力照明バンドルの角度範囲を示します。

Increase Output Aperture to capture 4 to 5 orders

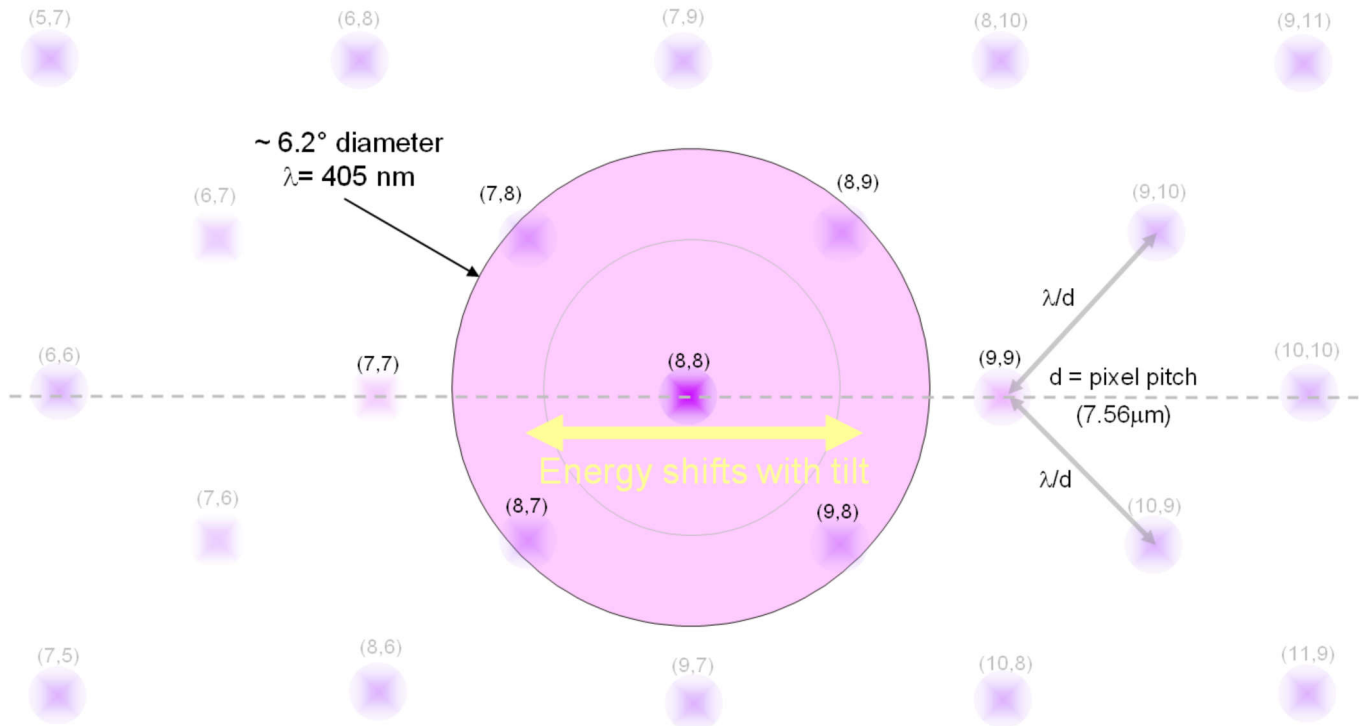


図 6-7. 拡大された出力開口による 5 つの回折次数の捕捉

回折次数はチルト角の変動によっては移動しませんが、照明角度の変化に伴い移動します。照明が角度 θ だけ動くと、出力側の回折次数は概ね $-\theta$ だけ移動します。そのため、TI では入力照明角度を $\pm 2^\circ$ 調整できる機構を設けることを推奨しており、これにより最も強度の高い 4～5 つの回折次数を出力開口で捕捉可能となります。

非コヒーレント光源の場合と同様に、出力開口の角度直径が達成可能な倍率縮小レベルの実質的な制限を設定します。例えば、ピクセルピッチ $7.68\mu\text{m}$ の DMD に 405nm のコリメート光を用いる場合、最大倍率縮小は約 8.3 倍となります。入射ビームに角度範囲がある場合は、その直径を出力開口に加味したうえで、達成可能な倍率縮小を算出する必要があります。

一般に、達成可能な最大倍率縮小率は、製造面に対する集光光学系の f 数によって決まり、出力開口径が推奨最小値となるよう DMD までの距離を設定することで以下のように算出されます： $2 \cdot \sin^{-1}(\lambda/d) + \theta_{\text{input}}$ 。以下の式は、最大達成可能倍率縮小率の概算を示します：

$$\frac{\cot\left(\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{d}\right) + \frac{\theta_{\text{input}}}{2}\right)}{2f} - 1$$

ここで、 θ_{input} は入力照明バンドルの角度範囲を示します。

まとめると、コヒーレント光源は、非コヒーレント光源と同様の 2 つの制限を持っています。しかし、最小開口径はチルト許容度だけでなく回折次数の角度間隔によって決定され、これが最大実用的な縮小率を制限します。

7 まとめ

以下に示す考慮事項に従うことで、ユーザーは 400nm までの光源を用いたアプリケーションに DLP テクノロジーを統合する際に有利なスタートを切ることができます。DLP テクノロジーは、直接描画リソグラフィー、3D プリント、ならびに高エネルギー光子を必要とするその他の新興エンド機器の分野で先駆的な役割を果たしています。卓越した DLP の高度な光制御が、アプリケーションの未来を切り拓きます。

8 参考資料

- テキサス・インスツルメンツ、[DLP テクノロジー入門](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[パルス光源を含むデジタル マイクロミラー デバイスの熱的考慮事項](#)、アプリケーション ノート
- テキサス・インスツルメンツ、[DLP® DMD テクノロジーにおけるレーザーの使用法](#)、アプリケーション ノート
- テキサス・インスツルメンツ、[DLP® 光学設計ガイドライン](#)
- Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 411, pp. 243 = [1285]–253 = [1295], 2004 年、「高い複屈折性を持つ液晶の紫外線安定性」 – Lin, Wu, Chang, Hsu 著。
- LIQUID CRYSTALS, VOL. 31, NO. 11, 2004 年 11 月, pp.1479–1485、「シアノ基およびイソチオシアネート基を末端に含む液晶の紫外線安定性」 - Wen, Gauza, Wu 著。

9 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Changes from Revision * (November 2014) to Revision A (August 2025)	Page
• 更新された概要.....	1
• DLP7000FLP、DLP9500FLN、DLP9000XFLS の各 DMD をタイプ A DMD の例としてリストに追加しました。.....	2
• この議論はタイプ A DMD に適用されることを明示しています。.....	3
• 残留チルトをほぼ平坦な状態に戻すためのアイドル デューティ サイクル動作に関する注意事項を追加しました。.....	3
• 光学設計ガイドラインの更新リンク.....	4
• この議論はタイプ A DMD に適用されることを明確にしました。.....	6

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated