次世代ステアリング性能を押し上げる多軸スキャニング

ヴラド・クリロフ、アーロン・カスティーロ

指向（ポインティング）システムは、人類の歴史を通してさまざまな用途に使われており、指向に加えて、今では走査（スキャニング）を目的としたソリューションに対し、その限界を押し上げることが絶えず（そして今後も）求められる。現在、その性能の進歩は、多くのイノベーションを促進している。

ビザンチン時代にまで遡って、ジンバルシステムは指向アプリケーションを支える主要要素だった。光学システムの指向制御は、その全体を可動プラットフォームに搭載するか、可動ミラーを最後の光学素子として使用することにより、実装することができる。後者の方法は、速度などの性能面でメリットがある場合が多い。

現在、光学システムの指向制御に可動ミラーを使用する、3種類のデバイスが市場に提供されている。すなわち、ジンバル搭載ミラー、屈曲（フレクシャ）に基づく高速ステアリングミラー（Fast Steering Mirror：FSM）、ガルバノメータである。ガルバノメータは、回転軸上にミラーを配置して、単一プレーン内の走査を実行する。2次元スキャンは、直交に配置された2つのガルバノメータを使用することによって行われる。これは、ガルバノメータペアまたはガルボスキャンヘッドとして一般的に知られている。

どのソリューションにも、それぞれ性能の限界がある。ジンバル搭載ミラーは、アパーチャと走査野サイズの範囲が最も大きいが、可動部品の質量がガルボスキャンヘッドやFSMよりも大きい。大きな可動部品は、宇宙環境における高速アプリケーションに不向きである。宇宙機上に引き起こされる外乱トルクの補正が必要になるためである。

FSMは、最も高速で最も帯域幅が広く、角分解能と精度が高い。しかし、そうした性能上のメリットと引き換えに、走査野は非常に小さい。機械的な屈曲を利用したミラー取り付け方法の制約と、システムに一般的に採用されているアクチュエータの種類に基づき、走査野は通常、±1°未満である。

ガルバノメータペアは、アパーチャが小さく、標準的な走査野が±25°という点で優れている。ガルバノメータペアの速度、サイズ、重量は、システムアパーチャの増加とともに悪化するため、50mm以上のアパーチャに対して使われることはまずない。回転軸の直交性など、一部のアライメント誤差は、ガルボスキャンヘッドでは補正が難しい。また、指向方向が温度とともに変化するため、防衛分野で利用するには問題がある。

米ライト・ステアリング・テクノロジーズ社（Light Steering Technologies）は、大きなアパーチャに対して多大なメリットをもたらす、「Multi-Axis Scanner」という3軸スキャンソリューションを開発して実証し、特許を取得した。このスキャナでは、水平方向の拘束がない磁気ジョイントが、ペイロ

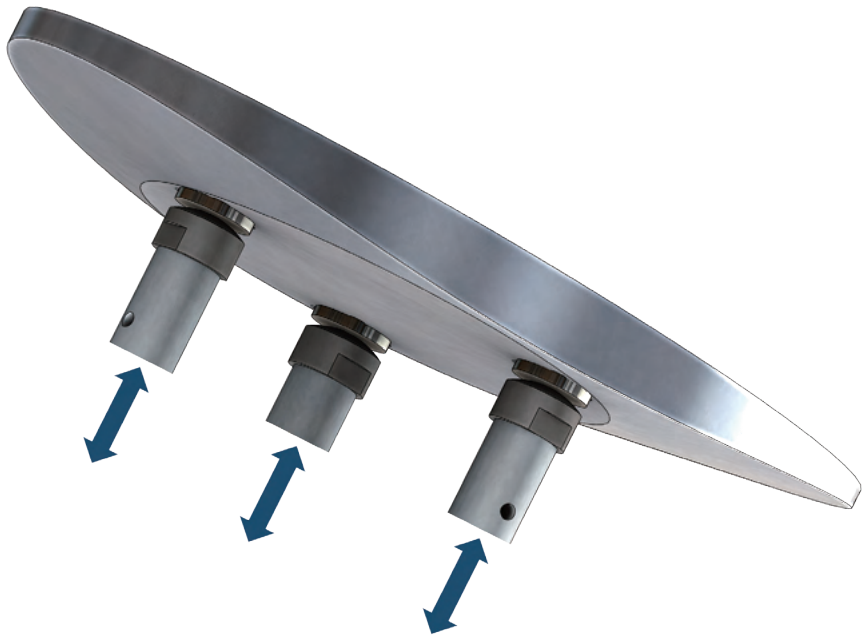


図1　ライト・ステアリング・テクノロジーズ社の「Multi-Axis Scanner」のリニアアクチュエーションと磁気ジョイントのコンセプト。

ード（ほとんどの場合でフラットミラー）を3つのリニアアクチュエータに取り付けるために使用されている（**図1**）。

水平方向の拘束がない磁気ジョイントは、永久磁石とベアリング要素で構成されている。ベアリング要素は、接触面と、強磁性合金鋼製の先端部からなるが、先端部の接触面は球状になっているため、2つの連接ジョイント部品の間は点接触となっている（**図2**）。永久磁石のベアリング要素には、光沢のあるニッケルめっきを施したり、サファイアディスクを接合したりと、磁気ジョイントのフラットな接触面の平坦度と耐久性を高めるための任意の方法を適用することができる。

各ジョイントの永久磁石は、ベアリング要素の接触面が同一平面上にあり、ミラーのフロント面と平行になるように、フラットミラーに取り付けられる。これにより、連接磁気ジョイント部品の間の3つの接触点を使用して、ミラーの向きを定義することができる。また、指向方向に影響を与えることなく、ミラーを水平方向に動かすこともできる。

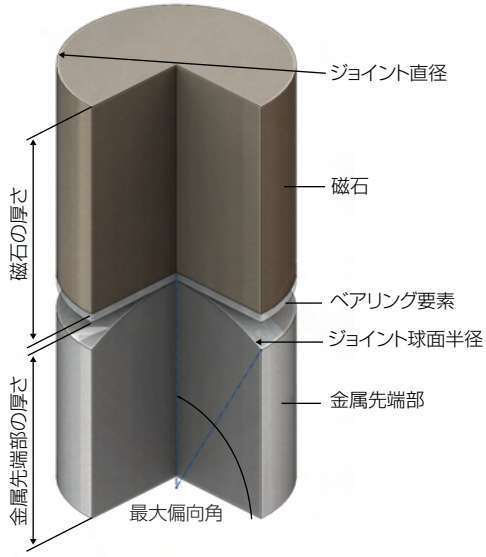


図2　磁気ジョイントの構成図。

水平方向の拘束がない磁気ジョイント

磁気ジョイントの構成部品のサイズは、ミラーの重量と、作動速度や走査野サイズなどのアプリケーション要件によって決まる。標準的には、環境や作動に伴う予想加速度の数倍に耐えられる軸引力を持つように設計される。

磁気ジョイント部品の材料は、環境と性能を考慮して選択される。ネオジム磁石（ネオジム、鉄、ホウ素[NdFeB]を主成分とする永久磁石）で、一般的に提供されている最も強力なグレードはN52で、65℃を超える温度での保存や動作が求められる、多くのジョイントの実装に採用されている。高温環境に対しては、ジョイント内の軸引力と引き換えに、適切なグレードが選択される。**図3**は、2つのNdFeBグレードの磁石の厚さと軸引力の一般的な関係を示したものである。

ベアリング要素の材料は、ジョイントの適用先に依存する。基本的な実装では、光沢のあるニッケルコーティングが磁石に施される。高い精度やジョイントの耐久性が求められる場合は、厚さ50～250μmのサファイアディスクを磁石に接合することができる。

3軸スキャンソリューションに対して想定されるほとんどの環境において、強磁性ステンレス鋼が、ジョイントの金属先端部の材料として望ましい。異なる種類の強磁性ステンレス鋼（400シリーズ）の間で、ジョイントの永久磁石に対する軸引力に目立った違いはな

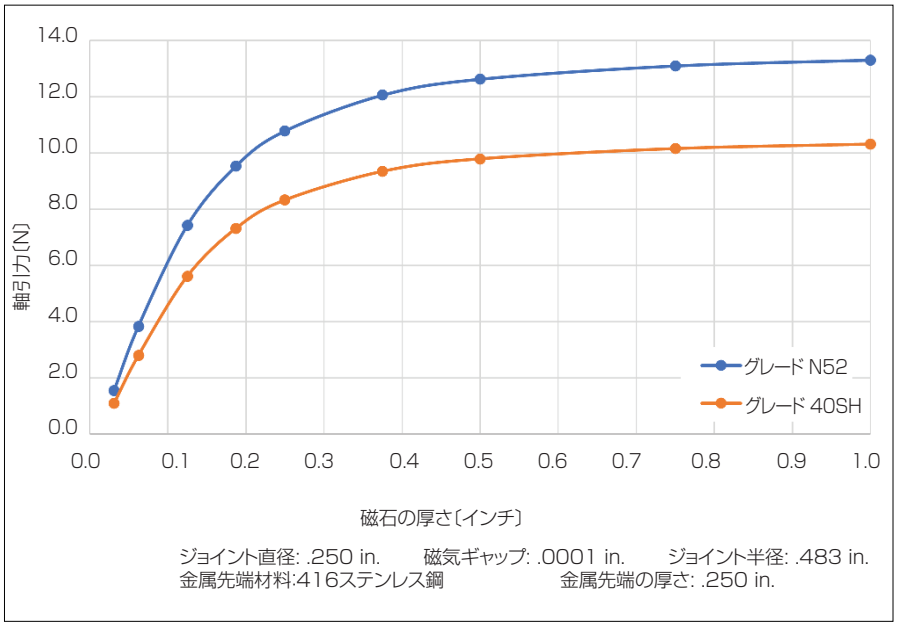


図3　軸引力と磁石の厚さの関係。

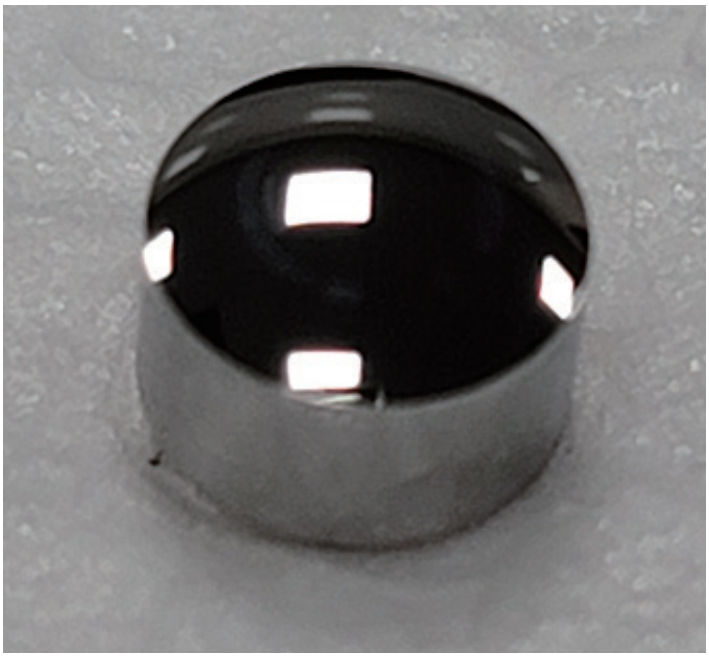


図4　光学仕上げが施された硬化ステンレス鋼製の先端部。

い。標準的な磁気ジョイント先端部は、硬化された430Cステンレス鋼合金でできており、ジョイント接触面には、光学品質のダイヤモンド旋削仕上げが施される（**図4**）。このレベルの表面精度によって、3つのアクチュエータの位置をミラー偏向に変換する際の誤差が、最小限に抑えられる。

水平方向の拘束がない磁気ジョイントの磁石と金属先端部は、どちらも放射対称で、直径は等しい。この形状によって、2つのジョイント部品が水平方向にずれた場合に、向心力の急速な増加が生成される。**図5**は、磁石と金属先端部の直径が3/16インチ、厚さが約1/8インチのジョイントの水平方向のずれと向心力の依存関係を示す例である。このジョイント形状を採用する3軸スキャンソリューションは、15～35gという標準ミラー質量に対応する。

金属先端部の球面半径は、機械的なミラーの最大作動範囲に基づいて選択される。ミラーの最大作動範囲は、走査野サイズから計算され、スキャナに対する最小入射角要件はない。多くのアプリケーションにおいて、ジョイント部品の間の空隙が最小になるように、すなわち、軸引力が最大になるように、最適化が行われる。

アプリケーション環境が許す場合は、ジョイント内の摩擦や摩耗を抑えるために、潤滑剤がジョイントに適用される。潤滑性と軸引力の両方を高めるために、ジョイントの空隙内に強磁性流体を使用することにより、性能をさらに高めることができる。

水平方向の拘束がない磁気ジョイントは、軸方向を除くすべての方向で固定の機械的な拘束がないことが、3軸スキャンソリューション設計などにおける、非熱化と機械的な動的応答に対する主要なメリットである。高出力レーザアプリケーションに対しては、ミラーを高速に交換できるというメリットもある。

3軸スキャンソリューションの設計時検討事項

水平方向の拘束がない磁気ジョイントに基づく3軸スキャンソリューションにおける標準的な設計時検討事項は、作動直径上にアクチュエータを等間隔に配置することである。また、ミラーは入射ビームに対して、入射角が最大偏向角の半分よりも大きく、入射ビームと反射ビームが偏向角の全範囲で分割されるように、配置する必要がある。公称入射角を45°として公称反射を90°とするのが、ミラーサイズの増加による一部の性能面の低下を受け入れつつ、直交システムレイアウトの利便性を実現するための一般的な構成であると考えられる。

この一般構成には、公称入射プレーンが存在する。従って、ミラーの動き（とそれに伴う光偏向）を、この公称入射プレーンに平行する成分と直交する成分に分割することができる。3軸スキャンソリューションのコントローラに組み込まれた算術エンジンは、ホストシステムから偏向角を受け取り、それらを各アクチュエータの線形位置に変換する。

水平方向の拘束がない3つの磁気ジョイントを使用したこのミラー取り付け方法に対し、さまざまなリニアアクチュエーション技術とミラー材料を組み合わせることができる。これによって、3軸スキャンソリューションを特定のアプリケーションに適応させる場合の、性能関連のトレード空間における選択肢の幅が広がる。

ボイスコイルや多相同期リニアモーターといった直接駆動リニアモーターは、最も優れた動的性能を備える。ボールねじやリードねじ駆動のアクチュエータは、大きな衝撃や振動が生じる環境でスキャナが動作する必要がある場合に使用することができ、走査速度と引き換えにシステムの堅牢性を高める効果がある。ピエゾアクチュエータは、走査野が非常に限られたアプリケ

ーションで使用することができる。

標準的な3軸スキャンソリューションのアクチュエータ設計では、線形のクロスローラーベアリングが、アクチュエータの取り付けに用いられる。剛性が高く、摩擦が小さく、動きの精度が高いためである。圧縮空気が一般的に利用される工場環境をはじめとする、要件が最も厳しいアプリケーションに対しては、エアベアリングも使用できる。

3軸スキャンソリューションは、スキャナの動作環境に適用可能な、任意の線形位置エンコーダ技術とともに使用することができる。光学エンコーダは最も性能が高く、アパーチャが75mm以上の3軸スキャンソリューション設計に簡単に組み込むことができる。アクチュエータ位置の測定は、誤差が非常に小さく、静的及び動的誤差に寄与する他の要因が非常に少ないため、ミラーの指向方向を決定するための信頼性の高い手段である。磁気ジョイントの接触面の精度は1ミクロン未満となり、アセンブリにおけるアクチュエータの配置誤差は、全体的な指向誤差からキャリブレーションによって除去することができる。動的な状態において、一般的なガルバノメータでミラーと一検出器の間に生じるようなねじり力は、アクチュエータ本体の中には存在しない。これにより、磁気ジョイントの金属先端部と線形エンコーダの読み出し位置の間の構造を、容易に堅牢にすることができる。

アプリケーションのニーズに応じて、絶対値エンコーダとインクリメンタルエンコーダのどちらでも使用することができる。インクリメンタルエンコーダを選択する場合は、アクチュエータのホーミングルーチンの絶対基準を設けるために、トラベルリミットセンサが追加される。

3軸スキャンソリューション技術により、公称指向時にはミラーの背後に本体がある状態となり、全体的なシステム精度をさらに高めるための追加の基準センサを実装することが可能である。その1つの例が、公称指向またはゼロ指向時のミラーの絶対位置基準を

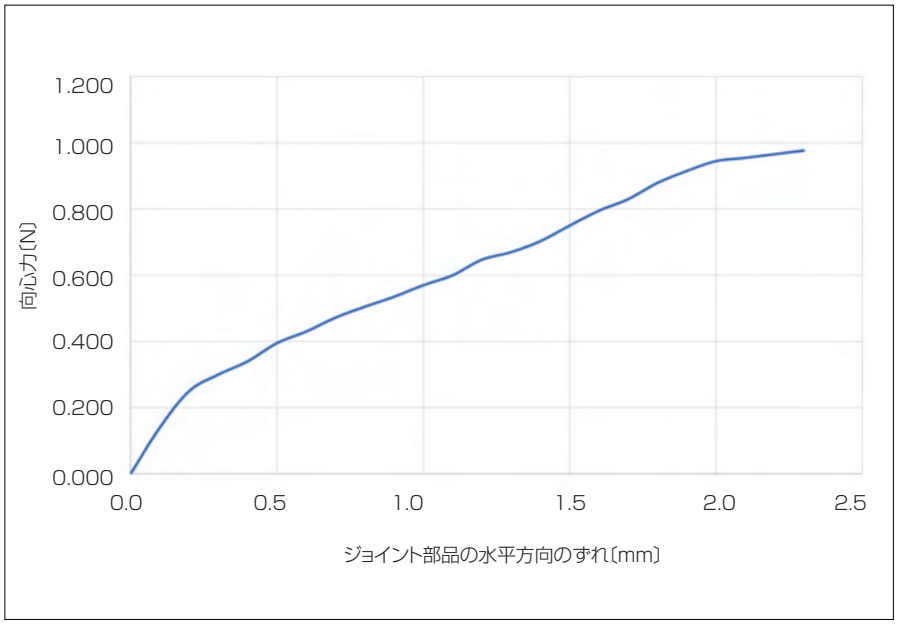
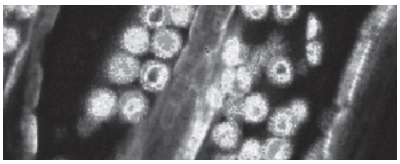
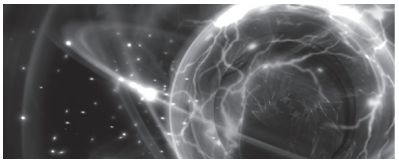
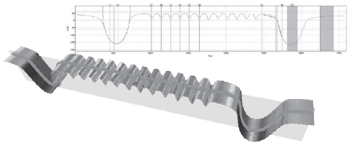
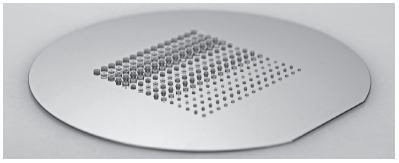


図5　向心力と水平方向のずれの関係。

レーザー・光技術のお困りごとは
レーザー専門商社の
JLC JAPAN LASER
にお任せください!
レーザー加工

顕微鏡、バイオイメージング

原子・分子・量子研究

検査・分析・評価

ナノフォトニクス、微細加工

光技術に関するご相談は
https://www.japanlaser.co.jp/
E-mail:jlc@japanlaser.co.jp
JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー
本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0861
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711

提供する、視線修正センサである。一般的なセンサ実装は、クアッドセル、レーザダイオード、(デジタルコントローラ上に実装された)視線修正アルゴリズムで構成される。レーザエネルギーは、平面で反射してミラーの背面に追加され、ミラーが公称指向状態にある場合は、そのエネルギーがクアッドセルに均等に分配される。各象限で測定される総エネルギーを基に、3軸スキャンソリューションは、閉ループ指向修正を行い、ホーム位置またはその付近におけるミラー表面を基準とした絶対位置を提供することができる。各ホーム遷移によって、システム精度は向上する可能性がある。ホーム遷移時には視線修正センサによって、ミラー表面からのホーム位置に対する能動的なキャリブレーションが行われるためである。

3軸スキャンソリューションの等間隔に並んだ3つのアクチュエータは、移動距離が同一で、楕円形の走査野を提供する。そのアスペクト比は、公称入射角に依存する。多くのアプリケーションにおいて、3軸スキャンソリューションのシステムレイアウトは、スキャナへの入力とスキャナからの公称出力が直交する状態が望ましい。そのようなスキャナ構成の公称入射角は45°、走査野のアスペクト比は1:0.7となる。

スキャンシステムの主要な性能トレードオフ

図6は、基本的なジンバル、ジンバルスキャンミラー、ガルバノメータペア、高速ステアリングミラー、ライト・ステアリング・テクノロジーズ社のMulti-Axis Scannerの間のトレードオフ項目の概要を示したものである。アプリケーションの走査野サイズが約±45°×約±35°を越えない場合は、3軸スキャンソリューションは、同等の性能を備えるジンバル搭載ミラーと比べて、サイズ、重量、消費電力の面でメリットがある。速度や精度といった他の性能パラメータについても最適化を施すことにより、最先端のジンバルシステムを上回る能力を達成することができる。宇宙分野における大きなアパーチャのメリットは、可動部品の質量が、同等の性能を備えるジンバル搭載ミラーよりも1ケタ小さくなることである。それによって、宇宙機に対するスキャナの慣性的影響が大幅に低減される。

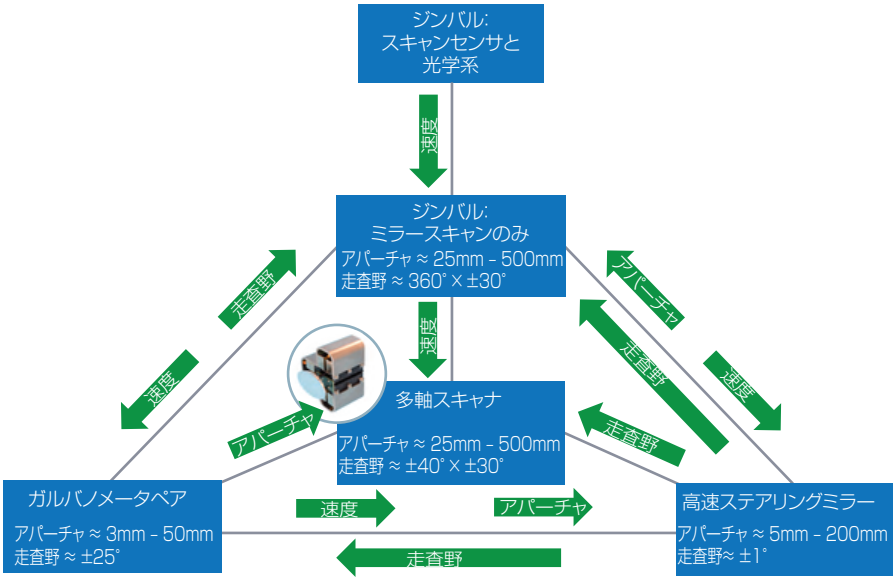


図6 スキャンシステムの間のトレードオフの関係。

ガルバノメータペアと比べた場合の3軸スキャンソリューションのメリットは、アパーチャが50mm以上のアプリケーションに対応できることである。そのようなアプリケーションに対し、ガルバノメータペアでは、2つめのミラーによるサイズと重量の増加に起因して、性能が急激に低下してしまう。3軸スキャンソリューションは、走査ポイントが1つであることが必須となるアプリケーションにも対応する。

水平方向の拘束がない3つの磁気ジョイントを使用したミラー取り付け方法は、高速ステアリングミラー設計に一般的に見られる機械的な屈曲の限界を克服し、同じアクチュエータ部品を使用して他の性能パラメータを維持しつつ、システムの走査範囲を拡大することができる。

3軸スキャンソリューションのもう1つの特長は、ミラーをフィールドで高速に交換できることである。これは、ミラーの損傷リスクが高い、高出力のレーザ加工において有効である可能性がある。

注記

Multi-Axis Scannerは、ライト・ステアリング・テクノロジーズ社の商標である。

著者紹介

ヴラド・クリロフ(Vlad Krylov)は、米ライト・ステアリング・テクノロジーズ社(Light Steering Technologies)の社長兼最高技術責任者(CTO)。アーロン・カスティーロ(Aaron Castillo)は、同社のビジネス開発担当上級副社長。

e-mail: vlad.krylov@lightsteering.com, aaron.castillo@lightsteering.com URL: lightsteering.com.

LFWJ