



医療の革新をもたらす MEMS

著者：Bob Scannell, Business Development Manager, MEMS Intertial Sensors, Analog Devices, Inc.

要約

この記事ではまず、部品の選択にあたって理解しておくべき重要事項などの MEMS モーション・センシングに関する原理を紹介します。また、医療用ナビゲーション・アプリケーション固有の課題に着目し、さまざまなセンサー・メカニズムから必要なセンサー処理、固有のシステム特性、最適なソリューションを提供するために必要なデータ処理まで、考えられるソリューションを検討します。さらに、重要なセンサー仕様を確認したうえで、それぞれの仕様がどのような役割を果たすかについて説明します。また重要なポイントとして、考えられるエラーやドリフトのメカニズムについて検討し、センサー選択の手助けをします。さらに、統合化、センサー・フェージョン、センサー処理（カルマン・フィルタ等）によるセンサー機能強化の可能性や方法についても説明します。

微小電気機械システム (MEMS) によるモーションの検出、キャプチャ、解析は、コンシューマ・デバイスやモバイル・デバイスで一般的な機能となっています。技術的な進歩が高精度のモーション・キャプチャを可能にし、応用範囲はさまざまな産業分野に拡大しています。将来有望な数多くの医療用診断アプリケーションや計測アプリケーションの場合も、産業用デバイスの精度とコンシューマ・デバイスのモバイル性や経済性の組み合わせで、大いに期待することができます。

医療用モーション・キャプチャの複雑さは、場合によってはハイエンドの軍用システムの複雑さにも匹敵します。たとえば、通常は車両、航空機、船舶などの輸送媒体用に開発されたアプリケーションに関連する精密ナビゲーションについても、外科用機器からロボット工学まで、さまざまな医療用アプリケーションへの利用が増えています。その一方、外科用ナビゲーション・システムの設計要求は従来の輸送媒体用ナビゲーションと共に通する点が数多くあるものの、使用環境と必要な性能レベルのために従来とは異なる新たな課題も生じています。

ヘルスケアの革新と価値を実現するモーション・キャプチャ

MEMS (図 1) と呼ばれるシリコン・ベースの加速度センサーとジャイロスコープ・センサーは、今日さまざまなデバイスに広く使われています。これらの慣性センサーは最小限の電力とサイズで動きを検出して測定するもので、モーションが関係するほぼあらゆるアプリケーションにおいて、あるいは不動であることが不可欠な条件となるアプリケーションにとって非常に重要な存在となっています。表 1 は、該当する基本的な医療用アプリケーションについて、その概要をモーション・タイプ別に示したもので、また、この記事の後半では、複数のモーションの組み合わせという複雑なシナリオによって新たな課題が生じる高度なアプリケーションについて検討します。

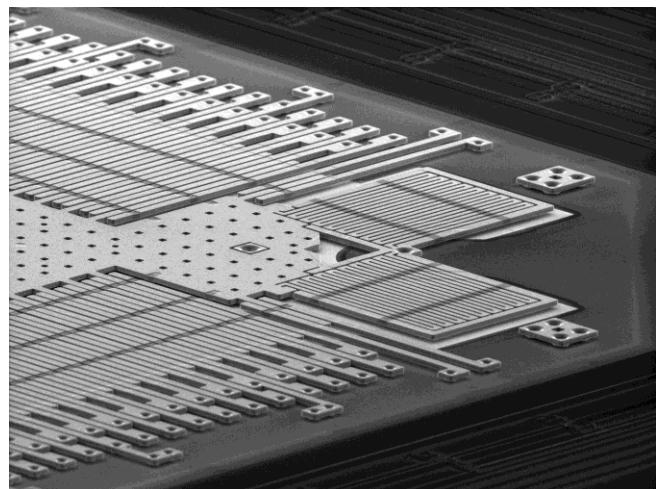


図 1. MEMS シリコン構造は加速度と回転を検出し、信号処理によって電気信号に変換します。

表 1. 複雑多岐なモーションを正確に把握する慣性センサーは医療アプリケーションでの利用を拡大します。

加速度／位置	傾き	角速度／角度	振動	衝撃	センサー・フュージョン
CPR 支援	患者転倒モニター	スキャン装置	振戻管理	高価値装置の保証	精密外科用ナビゲーション
活動モニター	寝たきり患者の姿勢／呼吸	基本的外科用ツール	機器の摩耗		遠隔診断
バイオフィードバック・モニター	血圧モニター、画像装置	人工装具			リハビリテーション

新たな計測／診断用ツールを実現するモーション・キャプチャ

CPR(心肺蘇生)における位置と反復速度の正確な決定、あるいは患者の身体に対するスキャン装置の精密な位置決めのように、医療用アプリケーションでは多くの場合、比較的基本的なものであっても非常に精密なモーション情報が役に立ちます。こうしたものでは、特に他のセンサー入力があれば、あるいは動きや使用事例について少なくとも一定もしくは既知の限界がある場合にはシングルセンサー・タイプで十分です。

モーション範囲が限定されている場合や運動力学が比較的単純な場合であっても、個々のセンサーのドリフト係数は十分に理解し、管理する必要があります。多くの場合、補正機能が組み込まれ、さらに組込みフィルタリング機能によりアプリケーションに合わせて調整できるセンサーが望ましいでしょう。

複雑なモーションに必要な精密センサーと組込みセンサー処理機能

1軸上の直線動作などの単純なモーションの検出ができれば、高齢者の転倒検知を始めとするアプリケーションには十分ですが、大部分のアプリケーションでは複数の軸上の複数のタイプのモーションが検出の対象になります。この複雑な多次元モーションを検出することができれば、最も重要な環境において精度を維持しつつ、新たな利点が得られます。

多くの場合、ある物体の運動を正確に把握するには複数の種類のセンサー（たとえば直線タイプと回転タイプ）を組み合わせる必要があります。たとえば、加速度センサーは地球の重力に反応するため、傾斜角を調べることができます。MEMS 加速度センサーは±1g の重力場範囲（±90°）で回転するため、その動きを角度に変換することができます。ただし、加速度センサーは静的加速度（重力）と動的加速度を区別できません。動的加速度を測定するには、加速度センサーとジャイロスコープを組み合わせ、2つのデバイスの後処理によって既知の運動力学モデルに基づいて直線加速度と傾斜を識別します。このセンサー・フュージョンの処理は、力学系（モーション軸の数、タイプ、モーションの自由度）が増加すれば、当然ながら複雑さも増します。

環境がセンサーの精度に及ぼす影響を把握することも重要です。温度が重要な問題になることは明らかですが、通常これは補正可能です。高精度の較正済みセンサーなどは自動で動的に補正します。また、見落とされやすい問題として、たとえわずかな振動でも回転速度センサーの精度に影響するおそれがあるという点を考慮しなければなりません。これは「直線加速度と振動の調整」と呼ばれ、ジャイロスコープの質によってはかなり大きな影響を与える可能性があります。センサー・フュージョンは、加速度センサーを使用して直線加速度を検出し、ジャイロスコープの線形加速度の感度を補正することによって性能を改善します。

多くのアプリケーション、特に基本的な方向（上下左右）や単純動作（動的か静的か）以上の性能を必要とするアプリケーションでは、多自由度のモーション検出が必要です。たとえば、6自由度の慣性センサーは、図2に示すように、3軸（x、y、z）それぞれの直線加速度と、同じ3軸の回転運動（ロール、ピッチ、ヨー）を検出することができます。

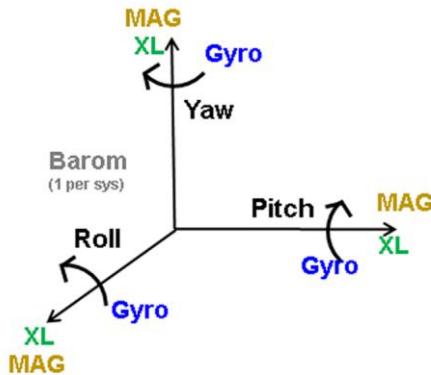


図2. 完全なモーション評価に必要な6自由度のモーション測定は、X、Y、Z方向の直線運動とロール、ピッチ、ヨーの回転動作によって構成され、多くの場合、2個の磁気センサーと1個の気圧センサーを追加します。

ナビゲーションの基本原理

工業分野では、慣性センサーのナビゲーションへの利用が普及しています。通常、これらのセンサーは、GPSなどの他のナビゲーション・デバイスと組み合わせて使用されています。GPSへのアクセスが当面にならない場合は、デッドレコニング(推測航法)と呼ばれる方法によって慣性ガイダンスで検出のギャップを埋めます。環境や性能上の目標によっては、光学センサーや磁気センサーなどの他のセンサーを追加することができます。センサーにはいずれもその種類によって制約があります。MEMS 慎性センサーは、他のセンサーと同じ干渉源に影響されることはなく、必要なのは慣性だけで衛星、磁場、カメラなどの外部インフラも不要であるため、他のセンサーの精度不足を十分に補正できる能力があります。主なセンサー方式のナビゲーションの種類とその長所および考えられる制約を表2にまとめました。

車両ナビゲーションで GPS ブロッケージ(遮断)が発生するよう、医療用システムでは光学ガイダンス方式であるため見通し線ブロッケージが発生する可能性があります。慣性ベースのセンサーでは、光学ブロッケージが発生するとデッドレコニングを行うとともに、冗長センシング機能によってシステムの信頼性向上させます。

医療用ナビゲーション

表1に概要を示した医療用アプリケーションのひとつでは、手術室で慣性センサーを使用し、患者固有の解剖学的構造に応じて人工膝関節や人工股関節のアライメントを正確に行うという用途があります。この場合の目標は、患者本来の自然な関節のアライメント軸に対する誤差について純粋に機械的な従来のアライメント方式では 3° 以上であるのに対し 1° 未満に改善することです。今日の人工膝関節全置換術(TKA)の95%以上は、機械的アライメントによって行われています。一部の機械的方法から光学的アライメントを使用するコンピュータ援用法への転換はすでに始まっていますが、おそらく装置に必要な経費の理由でなかなか進んでいません。機械的アライメントにしろ光学的アライメントにしろ、約30%はミスアライメント(誤差が 3° を上回るもの)となり、結果として不快な症状が出たり、再手術を余儀なくされます。ミスアライメントの低減は、侵襲的な手術を少なくし、手術の時間を短縮し、手術後の患者の状態を改善し、置換した関節を長持ちさせる効果があります。図3に示す完全な多軸慣性測定装置(IMU)としての慣性センサーは、TKAの精度を大幅に向上することが明らかになっています。

表2. 産業界で広く使用されているさまざまなナビゲーション用センサーの概要と医療用ナビゲーションへの応用

センサーの種類	主な利点	考えられる制約	医療用ナビゲーションに応用できるか？
GPS	長期にわたる絶対的基準	ブロッケージ(遮断)の可能性	不可能
磁気	インフラが不要(必要なのは地球だけ)	磁場干渉の影響を受ける	限定的
光学	直観的	見通し線が遮られること	限定的
慣性	自律的	絶対基準ではなく相対基準	可能

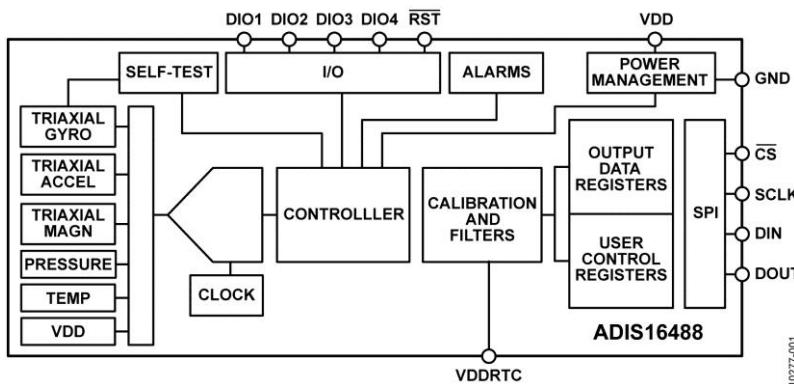


図3. MEMS ベースの慣性測定装置は、外科用機器に適した小型サイズで高精度の6自由度モーション測定を実現します。

センサーの選択とシステム・レベルの処理

慣性センサーの性能レベルには大きな違いがあります。ゲーム用に適したデバイスでは、ここで紹介した高性能なナビゲーションの問題には対応できません。ここで重要となる MEMS の仕様は、バイアス・ドリフト、振動の影響、感度、ノイズです。一般に高精度の産業用および医療用ナビゲーションには、コンシューマ・デバイス用の MEMS センサーが提供する性能レベルよりも 1 枠高い性能レベルが求められます。表 3 は、システムに関する一般的な検討事項をまとめたものです。この表に従って分析すれば、センサーの選択を絞り込むことができます。

表 3. センサー選択時の検討事項

システム変数	条件／検討事項
環境	屋内／屋外、温度、衝撃／振動、干渉源
性能等級／目標	精度、再現性、速度、安定性
オペレータ	支援または自律、訓練が必要か不要か
安全	ライフクリティカル、アクセス不能、冗長性
予算	インプリメンテーションにかかるコスト／時間、リスク

大部分のシステムでは、複数の種類のセンサーを効果的に組み合わせるために、何らかの形でカルマン・フィルタを実装します。カルマン・フィルタがシステムの力学モデル、相対的なセンサー精度、その他のアプリケーション固有の制御入力を考慮することで、実際の動きを最良の形で把握することができます。高精度の慣性センサー（低ノイズ、低ドリフト、温度／時間／振動／電源変動に対する安定性）を使用すれば、カルマン・フィルタの複雑さが緩和され、必要な冗長センサーの数や許容できるシステム運用シナリオについての制約が減少します。

高性能なモーション・キャプチャを実現するための 2 つの主要な課題は、未修正のセンサーのデータから較正済みの安定したセンサーのデータへの変換と、精密なセンサーのデータから実際の位置／トラッキング情報への転換です。第一の課題を解決するには、モーション較正とともに最適化されたセンサー処理エレクトロニクスを統合する必要があります。これには、運動力学の深い知識が必要です。さらに第二の課題を解決するには、図 4 に示すように、運動力学に関する理解と、対象アプリケーションの特殊性に関する深い知識を組み合わせることが求められます。

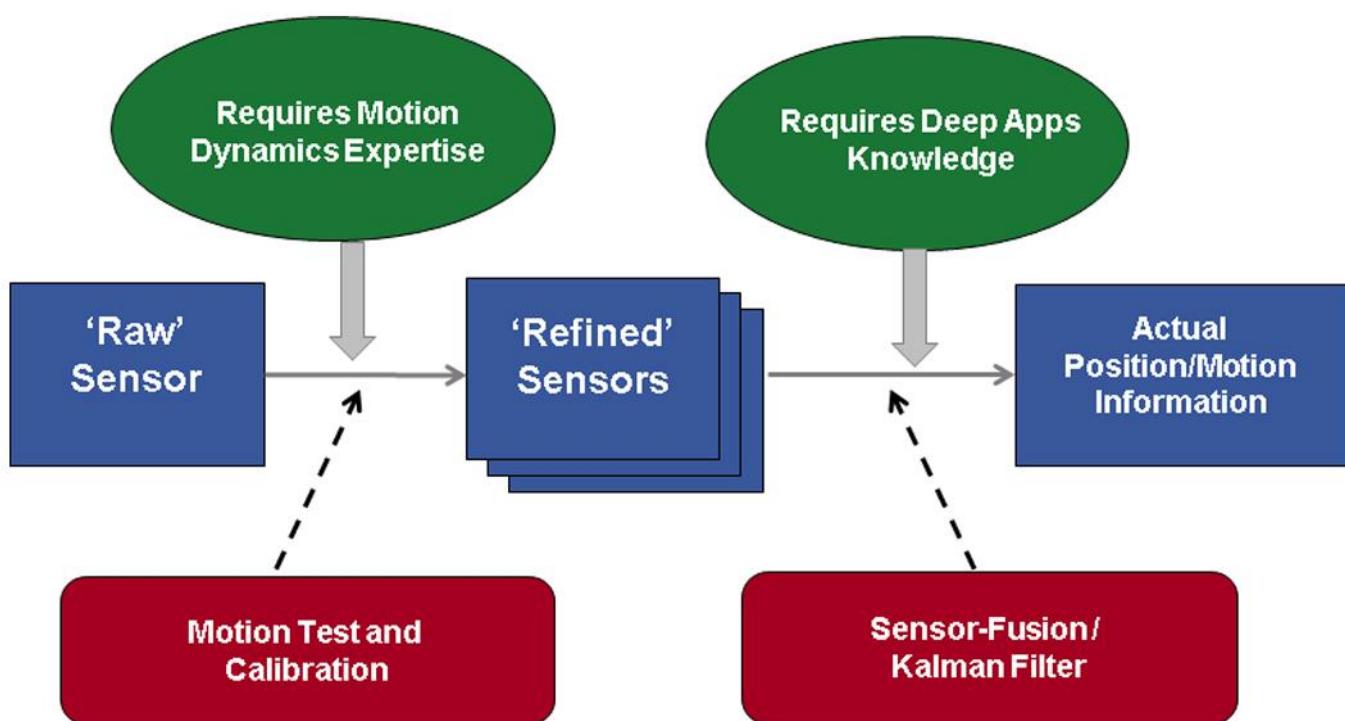


図 4. 精密なモーション検出は、高性能なコア・センサーに最適化されたセンサー処理を組み合わせ、さらに組込みアプリケーションに関する十分な知識から始まります。

高精度 MEMS センサーによって高価値の医療用 アプリケーションを実現

MEMS 慣性センシングは、商業化の可能性においても信頼性という面においても技術として十分に成熟しています。医療分野や産業分野では、モバイル・デバイスやゲームでよく知られた使用事例よりもはるかに厳しい条件が求められます。こうした場合、完全な統合化やセンサー処理が高度なものになるととも、性能でもはるかに高いレベルが必要です。たとえば、医療用ナビゲーションでのモーションは複雑であるため、安定性の高い慣性センサーをベースとし、その上に最適化された統合化システム、センサー処理、センサー・フェュージョンを構築しなければなりません。

高精度で耐環境性の高いセンサー開発が可能になったことによって、医療分野では MEMS 慣性センサーの利用が急増しています。これらの慣性 MEMS デバイスは、精度、サイズ、電力、冗長性、アクセス性の面で既存の測定／センシング方法を凌駕する利点を提供することができます。

幸いなことに、医療分野におけるこれら次世代の課題を解決するために必要な原理の多くは、センサー・フェュージョンや処理技術を含め、従来の産業用ナビゲーション問題から生まれた実績のある方法に基づいています。