

動きを瞬時に数値化する三次元計測器 ～モーションキャプチャー技術を応用した計測器～

株式会社ノビテック 画像計測システム部 佐藤真平

【1. はじめに】

現在の産業界において、振動・変位・耐久試験を中心とした試験は加速度計、歪ゲージ、変位計等の計測器を用い、計測対象の“動き”を数値化してきた。しかしながら、それらの手法は、

- ・ チャンネル数分の配線等の長時間計測準備
- ・ チャンネル毎の軸設定が困難
- ・ 必要な情報はログで解析
- ・ 計測対象の動きに制限有り
- ・ 機器の定期校正（ランニングコスト）が必要

であった。

本発表はモーションキャプチャー技術を応用する事により、上記の前提を覆し、様々なメリットを創出した VENUS3D について述べる。

【2. モーションキャプチャーの3次元計測器への応用メリット】

光学式モーションキャプチャーは、対象物の3次元的な動きを取得する事を得意としている。その特長を生かして3次元変位計測に適合する事により、様々な課題が解決する事ができる。さらに、計測の自由度が格段に飛躍する事から、モーションキャプチャー技術を3次元測定器へ適応をする経緯に至った。

従来の変位計測では、加速度計や歪ゲージ、レーザー変位計等、センサーを利用する手法が用いられているが、以下に挙げられる様々な問題があった。

- ・ センサーが有線であり、試験準備に結線をはじめとした試験準備のリードタイムが長くかかる。
- ・ 例えば3軸の加速度センサーを利用した場合、各チャンネルで個別に保有する軸定義を一致させることは極めて困難な作業となり、機器以上に運用誤差が発生する。
- ・ センサーは加速度、変位等の特定の物理量を算出する為、実験時に取得したデータを、実験後に相対変位や角度等の必要とする物理量へ表計算ソフト等にて再度計算を行わないと求められる結果に到達する事が出来ない。

- ・ 計算結果は全てのグラフで表現されるため、値と同期して試験対象の動作を確認することが出来ない。

これらの問題に対し、光学式モーションキャプチャーシステムを用い、非接触で計測を行うことにより、課題の一部は解決出来た。しかし、以下の問題により適応範囲が限られてきた。

- ・ システムが高額である（1システム1千万以上）。
- ・ 環境設定から計測開始まで長時間を要する（2～5時間）。
- ・ 計測環境が限られる（遮光環境でかつ、床面素材が反射しない）。
- ・ 有識者のオペレータが必要。



そこでモーションキャプチャーを計測器として利用するに当たり必要とされる運用面、ソフト面を補う事により、新しい計測手法になるポテンシャルに着目し、製品開発を行った。具体的には安価で手軽なオペレーションでかつ、3次元計測で必要とされるアウトプットがダイレクトかつリアルタイムで出力できるシステムとして製品化し、以下の優位性を創出した。

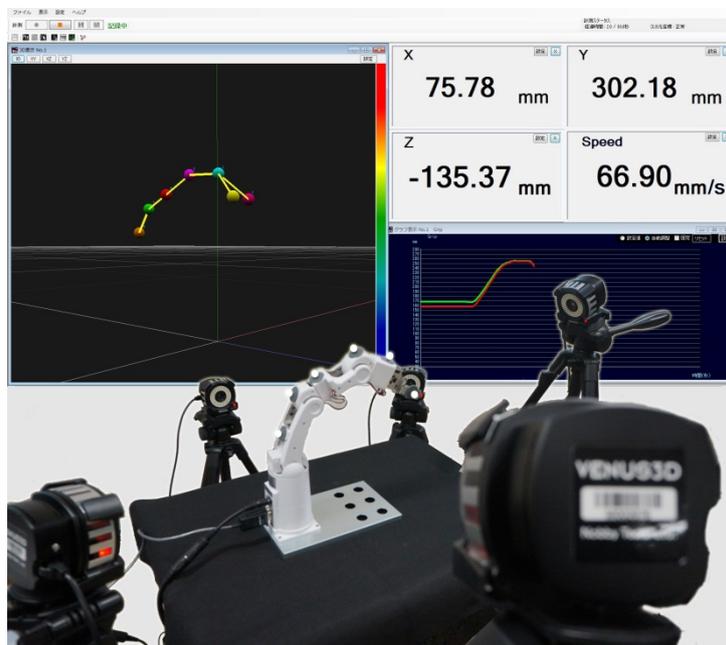
- ・ カメラの設置およびキャリブレーション作業に約15分。
- ・ マーカー（チャンネル）数に依存せず、短時間の準備で計測を開始する事が出来る（弊社で販売しているVENUS3Dは、同時に500点まで同時計測が可能）。特にシミュレーション比較等、高密度な計測点必要な実験においては、よりその効果を発揮する。

・複数の計測点の3次元空間内の座標がほぼリアルタイムにパソコンのメモリー内で算出される。そのため、メモリー上で物理量の計算を行うことができ、目的としていた物理量をダイレクトに取り出すことができる。

・計測点を座標で取得しているため、座標描写を行うことで、試験対象の動きを確認する事が容易である。

・空間および計測点における軸は同一に定義され、精度を保証し、各々の計測点の比較を容易に行う事が可能である。

等々、従来の3次元計測における問題点の多くを解決する事が出来る。このような計測システムを製品化したのがVENUS3Dであり、様々なフィールドで3次元計測器として利用頂いている。



【3. 計測原理と計測器への適応】

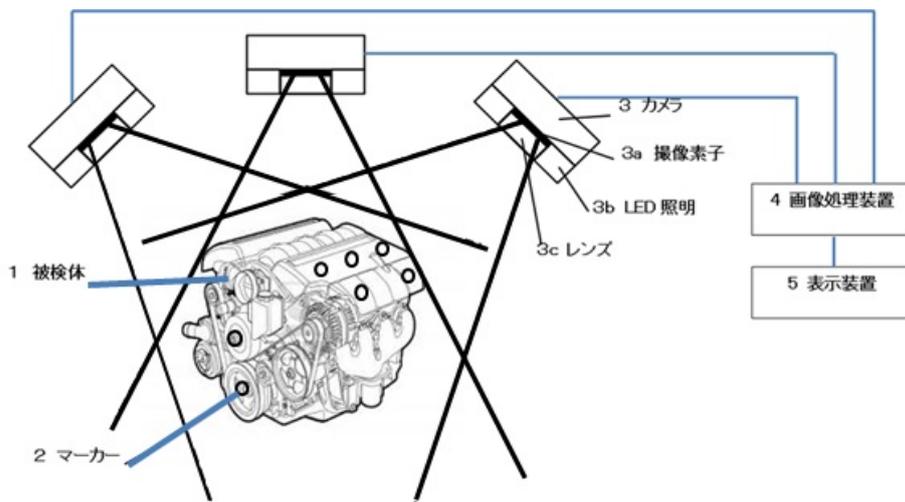
（1）光学式モーションキャプチャーシステムの構成

光学式モーションキャプチャー方法に基づいた3次元計測システムの構成を図1に示す。図1において1は被検体であり、動作する試験対象を例にとりシステム全体の構成を示す。2は被検体1の特徴点に装着されたマーカであり、具体的には小型の赤外線反射マーカを使用する。3はマーカ2を時系列的に撮影するカメラ（撮像装置）であり、被検体1の可動範囲を囲むよう被検体1の周囲に複数台設けている。各カメラ3には撮像素子（撮影部）3aと被検体1に光束を照射する照明装置3bが装着されている。3cはカメラ3に設けた撮影レンズである。

4はカメラ3で得られた撮影画像を時系列的に受信し、複数のカメラ3より得られた受信情報より被検体1に装着したマーカー2の各時間（フレーム毎）における3次元情報を演算し求める画像処理装置である。5は画像処理装置4で得られた被検体1のマーカー2に基づく特徴点の座標を表示する表示装置である。

カメラ3は三脚やクランプ等、カメラ間の関係を保持し続けることが出来る治具に固定する。複数のカメラは被検体1に関し、計測空間を中心にしてカメラ3間の距離が最低15度以上の角度になるように配置されている。また、各カメラからの視野中心がほぼ同一になり、被検体1の移動に対して、カメラ3が水平に並ばないように配置されている。

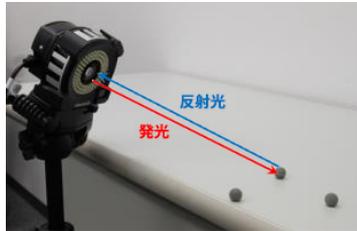
被検体1に装着したマーカー2をトラッキングするためには、複数台のカメラ3を撮影視野が重複するように配置する。これによって、「キャプチャーボリューム」と呼ばれるトラッキング可能な領域を作成する。カメラは計測中に動かないようしっかりと固定し、カメラが動いてしまうことによるキャリブレーションのやり直しを防止する。また良好なキャリブレーションとトラッキング結果を得るために、すべてのカメラ3が同一平面上に配置されないようにする。



(図 1. モーションキャプチャーシステム概略図)

カメラ3の撮像部3aのセンサーで受光した画像を用いて画像処理を行い被検体1に装着したマーカー2の座標を画像処理装置4で算出する。算出方法は二値化した画像に対してラベリングを行うことでマーカー2の3次元空間内の座標を算出する。3次元座標を算出する方法は、エピソードマッチングアルゴリズムを利用する。なお、照明装置3bからの光束であって、マーカー2からの反射光のみが撮像部3aで検出されるように撮像部3a

の光入射面には照明装置 3 b から放射される光束の分光特性に対応した光学フィルターが装着されている。



(画像 1 : カメラ 3)

(2) 計測ワークフロー

VENUS3D を用いて動作計測を行う際のワークフローを以下に記載する。

A, カメラ設置、配線

動作範囲を取り囲む形で 6 台～20 台程度のカメラを配置する。

前項に記載したカメラ配置の概要に従いカメラを設置する。全てのカメラ配置は治具への固定、ケーブルの結線等の作業を含めて 15 分程度で終了する。



(画像 2: カメラ設置風景)

B, キャリブレーション

3 次元座標算出に必要なカメラパラメータ算出を行う。オペレーションはキャリブレーションワンドと言われる構成された治具 (図 5: キャリブレーションワンド) を計測空間内の全てを網羅するように振り回し、カメラでキャリブレーションワンドに実装された 3 点のマーカーを認識させる。その後、原点および軸方向を定義する治具を各カメラより認識させ

る。以上の作業により、3次元座標算出に必要な焦点距離係数、画像の角度係数、レンズの歪み係数等のカメラ内部パラメータと各カメラの空間における座標とカメラセンサーの角度等の外部パラメータを自動的に算出する事が出来る。また作業時間は3分程度となる。以上の作業により、マーカーの3次元座標をリアルタイムに取得する事が出来る環境の構築が終了となる。

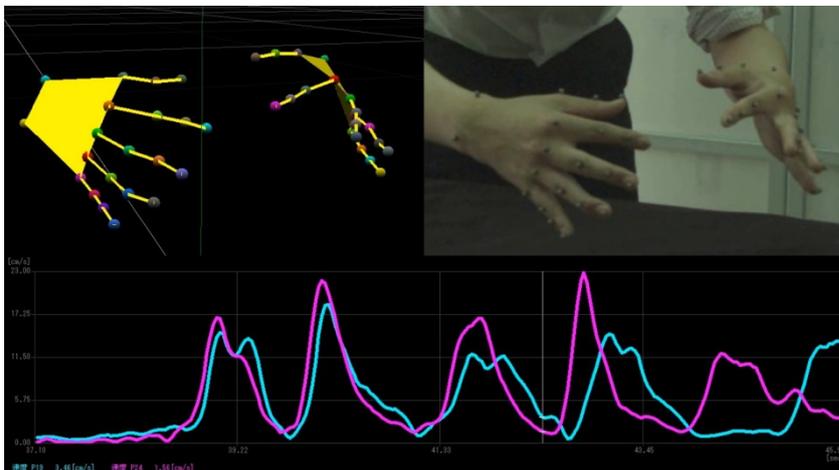
C, 計測器としての応用

一般的なモーションキャプチャーと同様の手法にて算出された座標に対し、計測器として適合する為のソフトウェア機能をシステムに付加した。その代表的な物を以下に記載する。

◇機能1. 時系列 ID 特定アルゴリズム

従来のモーションキャプチャーシステムはその発想がCG製作時の人体挙動データの取得であったこともあり、時系列の概念が弱く、計測向きではなかった。パラパラ漫画のイメージで、各時間軸における座標が空間内のどの位置に存在したかのみを算出し、どのように移動したという時系列情報としての情報を得ることが出来なかった。

工業計測のセンサーと同じ感覚でマーカーを配置すれば3次元計測を可能とするため、独自のアルゴリズムを開発、特別な手順を踏むことなく、各マーカーに時系列での関連を持たせる事を実現した。



(画像3:手指運動の3次元解析)

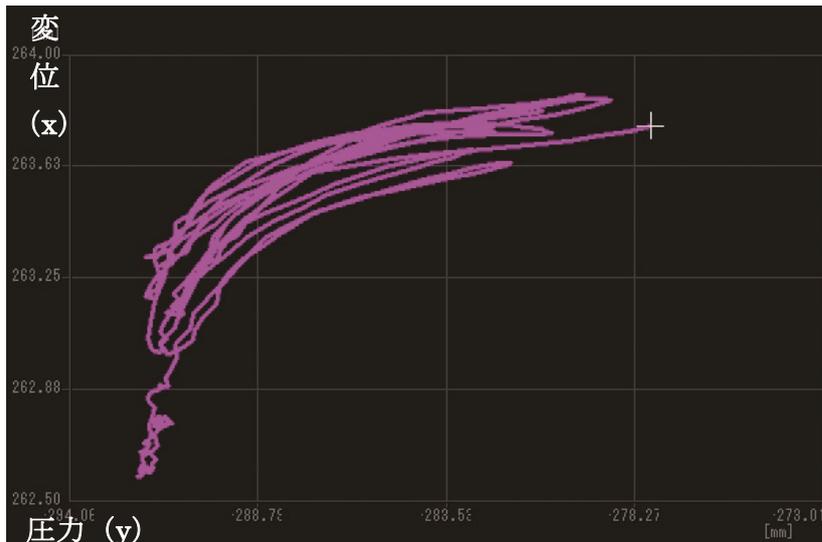
◇機能2. 外部計測機器との連携

試験時に試験体に刺激を与えながら計測を行う際、例えばロードセルや熱電対等、他の計測機で刺激の度合いを同時に計測する必要がある。VENUS3Dはそれらの外部計測機器も同

時にデータとして取り込むことを可能にした。それにより、複数の計測機器の結果を後から計算する事なく、

- ・ 温度変化に対する変位量
- ・ 加えている力量に対する変形

等のグラフを試験中にリアルタイムに表示しながら計測を行う事を可能にした。



(画像 4: 圧力センサーの値に対する変位量のグラフ)

◇機能 3. リアルタイム相対変位

本体にマウントされた部品等の変位を計測する際、従来は本体の動きを差分するために、本体にもセンサーを貼り付け、その変位量を計測対象である部品の変位量より差分する必要があった。試験後、表計算ソフトを用いて多くの計算を行い、やっと欲しい結果を得る事が出来るという手間のかかる計測が多くあった。VENUS3Dはその相対変位も UI 上にて基準となる座標を指定するだけで、相対座標、相対変位をリアルタイムに確認する事が出来る機能を追加している。

【4. 計測精度】

現在、モーションキャプチャー技術は、大別して光学式、磁気式、機械式に分類される。

その中で、人体の運動解析には光学式が最も適していると考えられるのは、

- ・ 複数のマーカーの同時計測が可能である
- ・ マーカーが小型軽量かつワイヤレスである

ことから、人体の運動を制限せず、より詳細な動作解析が可能であるためである。

計測精度という観点からも、磁気式のように外部磁界や相互干渉の影響がないため、光学式は測定精度にすぐれた方法であることが報告されている。今回、VENUS3Dでの測定精度の検証を行ったところ、空間内±0.01% (1 m³空間内で0.1 mm)の計測度精度が確認されており、十分な計測精度を有していると考えられる。

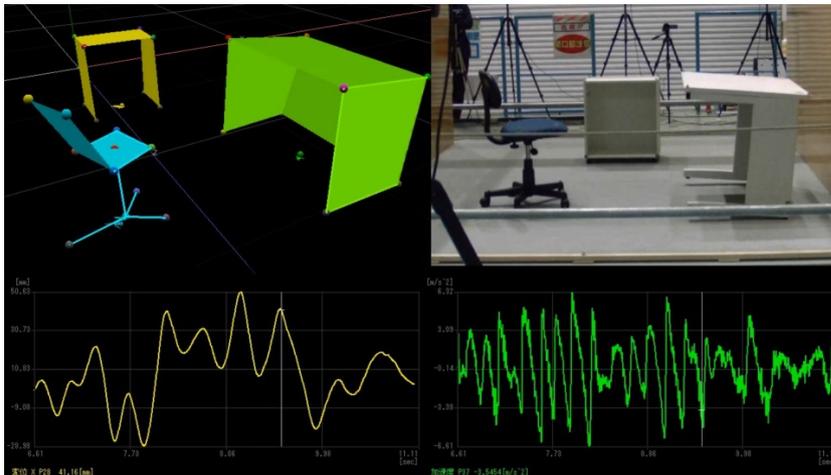
【5. 計測事例】

これまで述べたような優位性のあるVENUS3Dを使用した計測事例の一部を以下に紹介する。

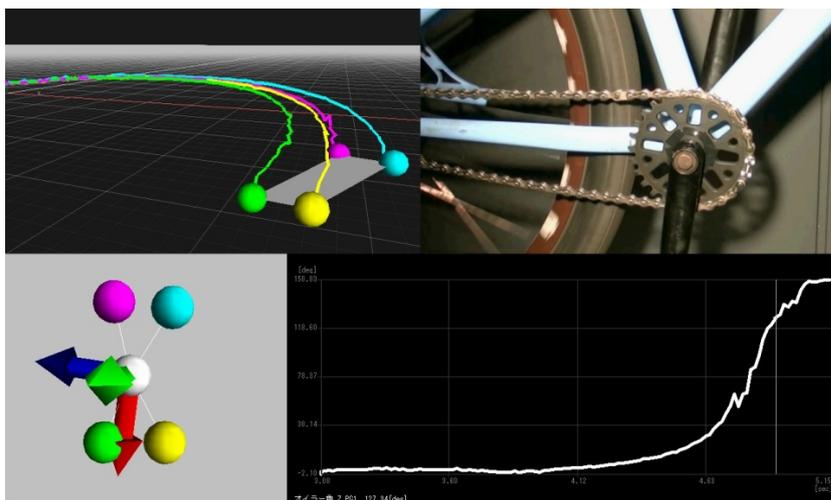
- ・ サスペンションのストローク変位計測
- ・ 自動車部品の静的試験
- ・ 建築物の振動計測
- ・ タイヤの形状変化
- ・ 衝突試験時のダミー座位計測
- ・ ベビーカーの安定走行計測
- ・ パッケージング機器の解析
- ・ ベアリングの挙動計測
- ・ 車体振動・ねじれ計測
- ・ 重機の振動計測
- ・ 飛行体の角度計測
- ・ 自動車開閉部の変位計測
- ・ ロボットのティーチング
- ・ センサーの3次元位置計測
- ・ 搬送機の挙動計測
- ・ 義肢装具装着時の動作分析
- ・ 各種ユーザビリティ評価
- ・ 書字動作の解析
- ・ 咀嚼・嚥下動作分析
- ・ スポーツパフォーマンス分析
- ・ ひざ関節のねじれ計測
- ・ リハビリテーションのリアルタイムフィードバック
- ・ 歩行分析
- ・ 脳性まひ患者の歩行解析
- ・ 水泳・水中運動解析

- ・屋外動作分析
- ・実車時の運転動作解析
- ・表情分析
- ・作業分析
- ・スポーツ用品開発

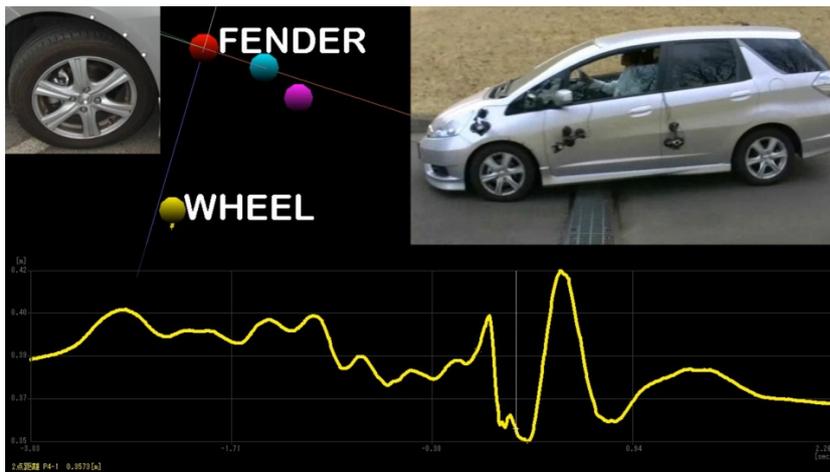
大小様々な計測対象をすぐに非接触3次元計測出来る為、産業用途から人体計測まで様々な事例がある。また、計測目的からFA現場での検査目的にも利用されており、非常に多岐に渡る計測用途に適合できるシステムと言える。



(画像 5: 振動試験における変位計測) 独立行政法人防災科学研究所様ご提供



(画像 6: チェーンの挙動解析)



(画像 7: 実車走行での計測)

【6. 最後に（今後のロードマップ）】

現在、本計測手法におけるシステムの高速化を要望されている。それにより、各種他計測器との完全同期やリアルタイムフィードバックの更なる高速化（例えば人体へのフィードバックを行う際、脳から神経を伝達し、筋肉まで命令伝達が行われる以上の時間以内のフィードバック）が可能になる。順次、高速計測システムのリリースに向けた取り組みを行っていく予定である。また、計測において計測機器の精度を上げる事と同時に重要な要素となる運用における誤差の最小化も継続して取り組んでいる課題である。例えばシミュレーションとの比較を行う際、マーカーの貼り付け位置誤差がデータに大きな影響を及ぼす。その為、だれもが簡単に正確なマーカーを貼り付ける事が出来るシートを開発している。また、計測環境の多様化に向けて水中計測用マーカー等、様々な付帯品の開発を行っている。さらに、マーカーの貼り付け位置の再現性を担保できるような治具の開発にも取り組む事により、3次元計測器としての価値を高めていく活動を行っていく所存である。