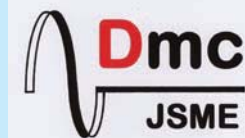




DYNAMICS



機械力学・計測制御部門ニュースNo.47

March 1, 2011

マルチボディダイナミクスの新たな展開

いわき明星大学 清水 信行

1. はじめに

読者層が幅広いことを考え「マルチボディダイナミクス (MBD)」について、「MBDとは何か、どのように発展したか」をまず簡単に紹介します。次に設計・解析にMBDのソフトを使用している技術者、MBDの問題に挑戦している研究者、などを対象として「MBD技術は設計・解析に変革をもたらすか」、「MBD研究はどこに向かっているか」を述べたいと思います。

2. MBDとは何か、どのように発展したか

MBDとは何か MBDとは、さまざまな部品 (ボディ) で構成される機構・構造系 (マルチボディシステム、MBS) の動きを、コンピュータを用いて解析し、ものづくりや研究に役立てる学問・技術です。一般に機械や類似の機能を持つ構造体は多かれ少なかれMBSであり、OA機器、ロボット、自動車、列車、建設機械、宇宙構造物、などと例を挙げればきりがありません。さらに生体系もMBSです。これらのMBSの運動と力を“丸ごと”扱う学問・技術をMBDと呼んでいます。図1は建設機械の一例です。いろいろな部品から成り立ち複雑な動きをして、複雑な力のやり取りが部品間で行われる事が容易に理解されます。

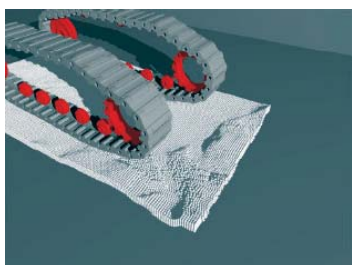


図1 (a) 建設機械 図1 (b) 建設機械の無限軌道部と土⁽¹⁾

このような機械の動きを解析して各部分や部品に働く力、消費エネルギー、操縦者の乗り心地などを知って設計や製品開発に役立てようというのがMBDの役割です。

MBDはどのように誕生し発展したか ニュートンは質点に関するニュートンの運動方程式を確立しました。後に続く多くの偉大な動力学者 (Euler, d'Alembert, Lagrange, Jourdainたち) はそれをMBSに適用できるような方程式に発展させました。近年の動力学者 (例えば, Kane, Haugら) はこれらの方程式を更にコンピュ

ータによって組織的に扱うことができるように再構築し、MBDの発展を促しました。

1960年代に衛星、航空・宇宙、機構、バイオメカニクスなどの解析の必要性和強力なコンピュータの出現によりMBDが生まれました。1977年にIUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) のシンポジウムにおいてMBDを力学の一つの独立した学問分野とすることが承認され、学問としての市民権を得ました。1980年代には現在の汎用MBD解析ソフトの原型である全機能完備のソフトが開発されました。1990年代以降、複雑なMBSのダイナミクスが研究対象となり、以後急速にMBDは発展し、今日に至っています。2000年代にはMBDの国際会議も活発化してきて、ヨーロッパ、アメリカ、アジアが地域的な国際会議を開催しています。2010年5月にフィンランドのラッペンランタにおいて第1回世界合同マルチボディダイナミクス会議⁽²⁾が開催され、上記の地域的な国際会議を束ねる動きが現れました。この会議には全世界から約180編、250人の参加者がありました。同年8月には京都において第5回アジア・マルチボディダイナミクス会議⁽³⁾も開催されました。これらを逐一紹介するには紙数が足りません。筆者の所属する(株)モーションラボのwebページ (<http://motionlabo.com>) にはMBD国際会議情報が掲載されています。興味のある読者は見てください。

1980年代以降、有名なMBDの汎用ソフトが次々と開発され産業界のダイナミクス問題の解析に応用されて役立っています。

3. MBD技術は設計・解析に変革をもたらすか

昨年暮に日本計算工学会の講習会「1D-CAEによる“ものづくり”&“ひとづくり”の革新—その考え方と手法・ツール—」⁽⁴⁾が開催されました。興味を感じて参加しました。この講習会では1D設計 (1次元設計; 必ずしも次元が1ということではなく、簡単に大局を見極める) が講義されました。詳しくは講習会のテキストを参照していただきたいと思いますが、ものづくりのできるだけ初期段階に粗くてもよいから、設計対象に対して大枠の設計上重要な (例えば、エネルギー、熱、電気、機構的な) ファクターを、シミュレーションを通して把握しよう、とするものです。そのための解析ツールの一つとして、「物理モデルシミュレーションツール」が紹介され、このソフトの体験講習が行われました。一つの試みとして面白いと感じました。

筆者はMBDの研究を始めた二十数年前から、MBDの

解析は機構・構造体の設計に重要な役割を演じると考え続けてきました。具体的にそれを示唆する書物も出版されています（例えば有泉徹氏の「CAEによる設計の改革術」⁽⁵⁾）。今のところ具体的で決定的な方法論の提案は見当たりませんが、最近、MBDソフトウェアをベースとした仮想環境での具体的な方法論を模索する試みがなされています。

以下において設計・開発・試作・試験の工程においてリードタイムを短縮（図2参照）して、解析主導設計を行う具体的な試みを模索するS. Kimらの試み⁽⁷⁾を紹介します。

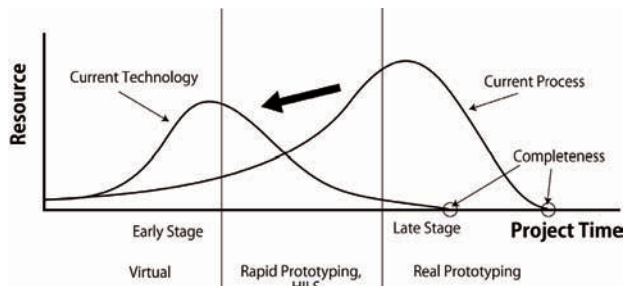


図2 工程短縮に寄与する仮想環境主導設計⁽⁶⁾

メカトロニクス分野の問題は電気、制御、機構・構造等の領域にまたがるため、これらの仮想環境を統合化するにはいくつかの難点を克服しなければなりません。この問題を解決しようと試みたのがこの論文です。特にファームウェア（FW）とハードウェア（HW）の不具合を同時に修正（デバッグ）するためにはCAEとCASE（computer-aided software engineering；コンピュータ利用のソフトウェア開発技術）を利用した仮想環境の確立が必要です。

この問題の重要な点を以下にまとめて見ます。メカトロニクス製品が複雑になればなるほど、その製品を制御するFWのデバッグに要する費用と労力は膨大になります。したがって、できるだけ開発の初期段階に検証（VE；verification）と妥当性の確認（VA；validation）を行い、バグをなくすることが大切です。メカトロニクス製品では機械を制御するためのFWの検証や妥当性の確認には制御対象の機械が必要です。しかし機械（HW）は開発の初期段階ではまだ完成しておらず、制御プログラム（FW）を開発しコンパイルする段階にはありません。一方、機械にとっては正常な制御指令をだすFWが必要です。これはある種のジレンマです。HWの完成を待ってFWの開発となれば、開発が遅れる要因となります。後工程になればなるほど問題が発生しても変更は容易ではなく、HW、FWの試験やデバッグの労力も多大となります。

優れた製品の開発環境とはVEやVAを開発の初期段階から行うことができ、この仮想環境での開発が大きな労力なしに実機の開発に直接的に移行できるようなものでなくてはなりません。上記のような問題意識から、この論文では具体例としてLEGO（児童用の組み立て玩具）のMindstormを使ってフォークリフト（forklift）ロボット模型（HW）をつくり（図3参照）、これを駆動し制御するためのFWの開発、試験、デバッグの試行実験を行っています。仮想環境として機械・機構系にはCAEの汎用MBDソフトウェアRecurDynを、駆動用モーター系にはSimulinkのようなブロックモデリングソフトウェアを、制御系にはCASEツールのZIPCが使われています（図4参照）。

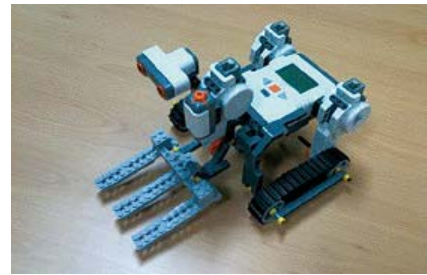


図3 LEGOマインドストームモデル⁽⁷⁾

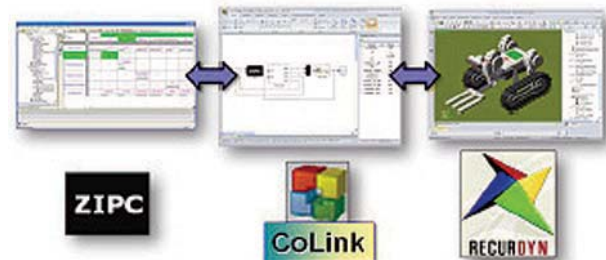


図4 ZIPC-Colink-RecurDynの制御-機械系の解析とものづくりの仮想環境⁽⁷⁾

ZIPCによりロボットの状態を監視して動作を記述する状態遷移マトリックスによりロボットの動きを制御します。これらの仮想環境では予めソースコードは必要としません。従って、ロボットの作業に対して予め想定される種々の作業のシミュレーションを行っておけばVEやVAが可能となり、バグの少ないソフトが完成します。ZIPCではこのように仮想環境で行った制御に対して実際の制御コードがC言語で生成できることから、仮想環境でのVEとVAは即ち実際のハードウェアとしてのLEGOを制御するCのプログラム作成がVEとVAを経て近似的に行われたこととなります。この仮想環境下での開発は、Colink部、RecurDyn部とも実製品と同じ内容を同時並行的に行っており、仮想環境での仮想製品が実製品の検証と有効性の確認に直接結びついています。この研究はものづくりの設計・開発・試作・試験に対する試みとして大変面白いと感じています。

次に現状の解析レベルと適用範囲を知るために、産業応用の観点からMBD解析の具体例を紹介します。MBDはFEM（finite element method；有限要素法）では苦手とされる駆動力が介在する問題、すなわち、機械の運転、動力伝達およびそれから生じる機械・機構系の動きの解析に威力を発揮します。解析適用範囲は非常に広く、そのことはつぎに示すACMD2010のセッション；(1)マルチボディ系の解析[論文投稿数12 papers]、(2)柔軟マルチボディダイナミクス[18]、(3)モデル化・定式化・DAE解法[4]、(4)高性能の定式化と計算法[7]、(5)車両のダイナミクスとタイヤのダイナミクスを含む制御[13]、(6)接触・衝突および摩擦[9]、(7)鉄道系のダイナミクス[9]、(8)マルチボディ系の制御[5]、(9)ロボティクスとメカトロニクス[10]、(10)バイオメカニクス[8]、(11)マルチボディ系の最適化と感度解析[7]、(12)マルチボディ系の流体・構造連成[8]、(13)航空宇宙のダイナミクス[3]、(14)機械要素のダイナミクス[3]、(15)教育とソフト開発[3]、(16)種々の応用[4]からも伺い知ることができます。紙面の都合で詳しくは説明できませんので、是非、一度ACMD2010⁽³⁾のProceedingsをご覧ください。面白い応用など新しい発見があるものと思います。IMSD2010⁽²⁾でも(1)～(16)とほぼ同じ内容のセッションが設けられました。

ACMD2010⁽³⁾のProceedingsから特徴的であると思わ

れる論文を筆者の主観で拾い上げてみました（その他にも多くの優れた論文があります）。

- 複雑な宇宙構造物、大規模展開反射鏡アンテナなどの解析は硬い積分となる。この難点を克服。F. Cugnon, P. Howard, J. S. Prowald and M. Milano
- 波力を受ける洋上風力タービン発電システムの応答を解析。J-S. Jang and J-H. Sohn
- 車の追突による鞭打ちによる頸部のダメージ応答を人の首部のモデルを作成して解析。J-E. Jung, H-S. Han and S-J. Yang
- ドラムタイプ洗濯機の流体マウントの設計と性能を解析。H. Li and W. S. Yoo
- イナータ（機械的な2ポート要素）の列車モデルへの導入とその系に対する安定・性能の解析。F. C. Wang and M. R. Hsieh
- 高架台を有する消防車のモデリングと解析。耐荷重特性、PID制御、油圧シリンダーなどを検討。Z. Feng, J. Li and L. Zhang
- 高速回転時の自動車エンジンのタイミング・サイレント・チェーン系の解析。種々のスピードと荷重に対して解析結果と実験結果を比較。C. Dong, F. Meng
- ブームと門型クレーン系の動解析と設計の実施。クレーンの操作に適合する軌道実現、エネルギー消費の低減、応力解析などを実施。Y. Sun and D. Li
- 大型船から荷役を陸揚げする小型船の港湾移動クレーンの操作機構解析。水上操作のため安定性解析が重要。Y. S. Jung, M. S. Kim and W. S. Yoo
- 架線とパンタグラフ間の接触力の変動解析。ANC法、FE法の解析結果と実験結果を比較。M. A. Abdullah, Y. Michitsuji, M. Nagai and N. Miyajima
- 周期励振をうける大きくたるんだ柔軟ケーブル構造系に働く重力復元力とこの影響下のケーブルの挙動と安定性の解析と実験（図5参照）。K. Matsuda, M. Watanabe and K. Hara⁽⁸⁾

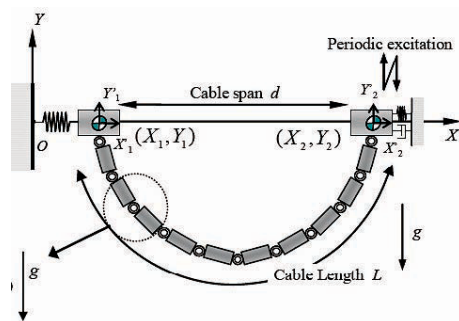


図5 柔軟ケーブルの解析モデル⁽⁸⁾

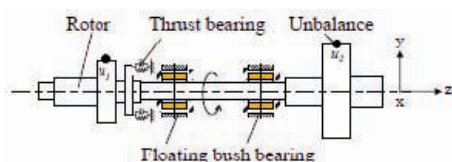


図6 (a) ロータ軸受系⁽⁹⁾

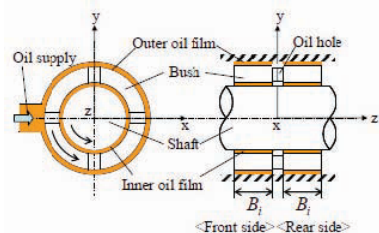


図6 (b) 浮きブッシュ軸受⁽⁹⁾

- 高速回転機械におけるロータ-浮きブッシュ軸受の油膜潤滑による流体力とロータ運動との連成運動解析と実験（図6参照）。M. Inagaki, J. Ruebel, A. Kawamoto, T. Abekura, A. Suzuki and J. Starke⁽⁹⁾
- 地震時に高速走行する列車と軌道との相互作用解析。M. Tanabe, H. Wakui, N. Matsumoto, M. Sogabe and Y. Tanabe
- 強地震時の高速走行車両の脱線と脱線防止ガードレールの効果解析。T. Morimura, K. Nishimura, Y. Terumichi and K. Sogabe
- 画像低下解析用の光学レンズ系のシミュレーション実施。P. Eberhard, N. Wengert and A. Touihri

以上のようにMBD解析では実際的で広範囲なテーマが数多く扱われています。

4. MBD研究はどこに向かっているか

まずACMD2010で発表された論文の中でMBDの研究として特徴的であると感じたものを紹介し、その方向性の一端を紹介します（すべてが紹介されている訳ではありません）。

- 改定ISO 基準2631に基づいた自動車の乗り心地評価の実施。W. Schiehlen, P. Ziegler and A. Taenzler
- 土の挙動を3次元個別要素法（離散要素法）で扱いクローラー車両のグロウサと土の相互作用解析の実施。T. Koizumi, N. Tsujiuchi and R. Akatsuka
- 惑星探査機「はやぶさ」2号機に搭載する小惑星標本コア採取方式は打ち込み・貫入法である。数十グラムの土を地球に持ち帰るための小惑星に打ち込む貫入実験を種々の土で実施。K. Iijima, K. Satoh, R. Ohkawa, H. A. Fujii and K. Uchiyama
- 列車の衝突時に縦に一列に並ぶ座席において乗客が安全性を確保できることを確認するための列車内の座席配置の感度解析。M. Carvalho, J. Ambrosio and J. Milho
- MBDの形状最適化問題ではモデル次元の縮小化が必要である。耐久性に基づく形状最適化の問題に対して自動的に縮小化を行い、誤差制御を行うモデル縮小化法の提案。J. Fehr, C. Tobias and P. Eberhard
- 薄膜製造プロセスでは狭いギャップ内を薄膜が移動する。このときに発生する進行波の生成実験とシミュレーションの実施。G. Kudou, M. Watanabe and K. Hara
- 剛体・柔軟体系のMBシステムの半再帰法による方程式の導出と高効率な陰的積分法の開発。F. J. Funes and J. G. de Jalon

以上の研究の一端を見てもそのテーマは広く、MBD研究がどの方向に進んでいくかを明言することはできません、が以下のような研究は社会的、学問的に必要であると考えます。

- (1) ものづくりのための優れた仮想環境の構築
- (2) 新しいモデル化法、高性能な定式化法、計算法の開発
- (3) 接触、衝突、摩擦の新しい定式化法、実用化法
- (4) 各分野でこれまで解けていない具体的な問題の解決
 - ・自動車と鉄道車両
 - ・建設機械
 - ・航空宇宙
 - ・往復機械と回転機械
 - ・バイオメカニクス
 - ・制御
 - ・最適化と感度解析
 - ・流体・構造連成
 - ・ロボティクスとメカトロニクス
 - ・実機との相関

5. おわりに

MBDとは何か, MBD技術は設計・解析に変革をもたらすか, MBD研究はどこに向かっているか, について簡単に説明しました. 紙数の制限から説明しきれないことが多く, 当初書こうと計画していたことを断念せざるを得ませんでした. 幸いシミュレーション学会誌の小特集号に「マルチボディダイナミクス 研究, 応用, 教育の最前線」⁽¹⁰⁾が最近, 掲載されました. 格好の記事であると思います. 是非, 一読されることをお勧めいたします.

参考文献

- (1) T. Heyn, D. Negrut and A. Tasora, Tracked Vehicle Simulation on Granular Terrain Leveraging Computing on GPUs, CD-ROM Proceedings, ACMD 2010, August 23-27, 2010, Kyoto.
- (2) The First Joint International Conference on Multibody System Dynamics, May 25-27, 2010, Lappeenranta, Finland.
- (3) The 5th Asian Conference on Multibody Dynamics, August 23-27, 2010, Kyoto, Japan.
- (4) (社)日本計算工学会, 講習会[No.10-01], 1D-CAEによる“ものづくり” & “ひとづくり”の革新, 2010年12月14日, 東京.
- (5) 有泉徹, CAEによる設計の改革術, 日刊工業新聞社, 2000.
- (6) J. H. Choi, 私信をもとに作図, 2010.
- (7) S. Kim, K. H. Cho, D. J. Yun and J. H. Choi, The Interdisciplinary Simulation Environment Including the Firmware and the Mechanical System, CD-ROM Proceedings, ACMD 2010, August 23-27, 2010, Kyoto.
- (8) K. Matsuda, M. Watanabe and K. Hara, Dynamic Behavior and Stability of a Flexible Cable Structure with Large Sag Subjected to Periodic Excitation, CD-ROM Proceedings, ACMD 2010, August 23-27, 2010, Kyoto.
- (9) M. Inagaki, J. Ruebel, A. Kawamoto, T. Abekura, A. Suzuki and J. Starke, Coupling Analysis of Dynamics and Oil Film Lubrication on Rotor-Floating Bush Bearing System, CD-ROM Proceedings, ACMD 2010, August 23-27, 2010, Kyoto.
- (10) 田辺 誠 他, 小特集「マルチボディダイナミクス 研究, 応用」, シミュレーション, 第29巻, 第2号, 平成22年, pp.2-67.