

建物制御システムのコミッショニングの自動化

D. R. Jorgensen, A. L. Dexter

Department of Engineering Science, University of Oxford

Parks Road, Oxford OX1 3PJ, U.K.

概要

本論文では、大規模の商用ビルにおける空調システムのコミッショニングを自動化する手法について論じてゆく。ビルとプラントのシミュレータに触れて、コミッション対象であるビル空調制御の運用について説明してゆく。制御システムが正しく動作しているを判断する手法を述べる。ビル空調制御が良好に働いている事例と実ビルで起こりうる2つのフォルトを、データを用いて例解する。原因不明な現象が起きた時に、制御性をどのように評価するかという問題を議論する。

イントロダクション

ビル居住者の快適性や生産性は、HVAC システムの性能に依存する (Prince 1986)。現実には、その性能は制御システムがどのようにコミッショニングされたかに左右され、設計仕様に沿ってどれだけ作業が進められたかによる。しかし、条件は季節や昼夜によって異なってくることから、システムは広い条件でコミッショニングされなければならないので、コミッショニングでやるべきことは、不完全に規定されていることが多い。コミッショニング手順を決めるにはプラントの動作を熟知することが必要であり、コミッショニング作業の順番やテスト項目の内容は、コミッショニングエンジニア次第である。ビルのイントールや建設は非常に複雑な作業を伴い、たくさんのサブコンが関わるので、必然的にコミッショニングの出来は、関わったビルや会社によって異なってくる (LAWSON 1989)。コストを削減させるために、コミッショニング作業のある段階が省略されたり、並行作業となったりする。建物制御システムのコミッショニングを自動化することには重要な意義がある。

ビル環境制御の性能をシミュレーションベースで評価するツールを開発するために、OXFORD 大学にてビルのシミュレータが開発された (Dexter and Haves)。このシミュレータはリアルタイムで動作し、ビル建物や HVAC プラントからなり、別な制御をしている他のコンピュータに接続できるハードウェアのインターフェー

スを有している。このオンラインシミュレータは自動コミッショニングのために開発された。シミュレーションを使って、リヒートコイルのバルブが正しく設計・設置されたか判断するテクニックは開発されている (Haves et al 1991)。動作範囲内で異なる運転点でのゲインを計測し、その予想値と比較することで、設置での問題点や設計フォルトを整理することが可能となった。

テストデータはオンラインで収集されて、観測された応答はパソコン上の知識データベースを利用して評価された (Goodier, 1990)。

この論文では、ビルとプラントのシミュレータを使って、ビルのコミッショニングをシステムチックなアプローチで実施することに取り組んだ。トップダウンのアプローチの発想で、コントローラの調整パラメータのデフォルト値を使ったクローズループテストに始まる。クローズループテストが失敗した場合に、問題の原因を特定がオープンループテストにより可能になる。大きなオフィスビルの1ゾーンでの温度制御のコミッショニングが今回のケーススタディである。

ビルシミュレータ

コンポーネントベースのシミュレーションプログラムである HVACSIM+ (Park et al 1985) を用いて、典型的なオフィスビルのシミュレーションを行った。HVACSIM+では、ステップな非線型な差分代数方程式を基軸とする解法となっている。プログラムがモジュールで体系化されていて、コンポーネントをモデルの追加したり、修正したりが容易である。また、システムを区切って、プラントやコントローラをシーケンシャルにシミュレーションすることが可能である。その単純化されたビルには、3つのゾーンをうけ持つ VAV 空調機がある。空調機は外気ダンパや還気ダンパ、排気ダンパ、プレヒートコイル、冷水コイル、ファンなどで構成されている。空気がダクトを通じて室内に送風されて、エアプレナムに戻ってくる。個々のゾーンには、リヒートコイルと VAV ユニットがあり、室内

への給気温度や風量を変化させる。中央のプラントには、火炊きのボイラーとレシプロ冷凍器、冷却塔が置かれている。ボイラーとチラーのモデルはステディーステートなモデルで、出口温度の制御は理想的であると想定した。建物のモデルは、室内と天井プレナムの蓄熱を表現するために、2つのキャパシタンスで記述した。ひとつのキャパシタンスは、1時間を超えるコンスタントな蓄熱時間を表現し、もう一方のキャパシタンスは空気や熱容量が小さい物体を表現している。シミュレーション対象のビルは、実際のビルとして典型的なものである。気象データは、1時間毎の温度と1分毎の日射量のデータを用いている。そのデータは6月のロンドンのもので、冷凍機はテスト期間には動作し続けなければならない条件である。図1はフィルタをかけていない相当外気温度[SAT]のデータである。空調は7:15に起動して、17:00に停止している。オフィスが使用されていない時間に、コミッショニングのテストが行われていると想定される。

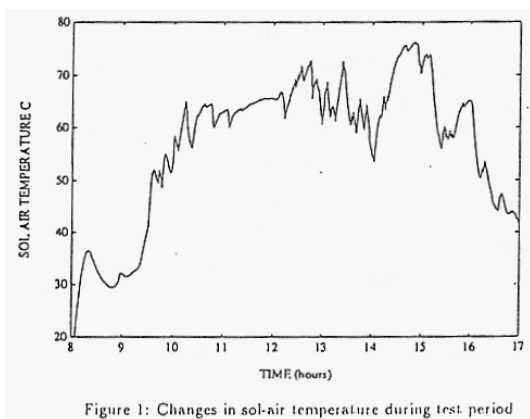


Figure 1: Changes in sol-air temperature during test period

制御スキーム

図2は制御のスキームで、コントローラのコンフィギュレーション、それにつながるセンサやアクチュエータを示している。制御のスキームはオフィスビルでは典型で、ふたつのメインの制御ループを有している。

給気温度

コントローラ C1 は、給気温度を設定値に一定に保つために、温水弁、ミキシングダンパ、冷水弁をシーケンシャルに制御している。乾球温度のエコノマイザであるコントローラ C2 は、外気温度と還気温度を計測して、ミキシングダンパの開閉方向を決定している。通常の運転では、Supervisory コントローラの C4 が、ゾー

ンの最大冷房負荷をまかなえるように、給気温度設定を 10~17°C の間で変更してゆく。

室内温度

室内温度はコントローラ C3 で制御されている。リヒートバルブの開度や VAV ボックスへの要求風量が決定している。冷房モードの時に設定値は 24°C で、暖房モードの時に 20°C となる。給気温度を計測して VAV ダンパの開閉方向を決めて、冷房能力を増減させている。

C1 と C3 は一般的な PI コントローラで、メーカーが推奨するデフォルトのパラメータが設定されている。

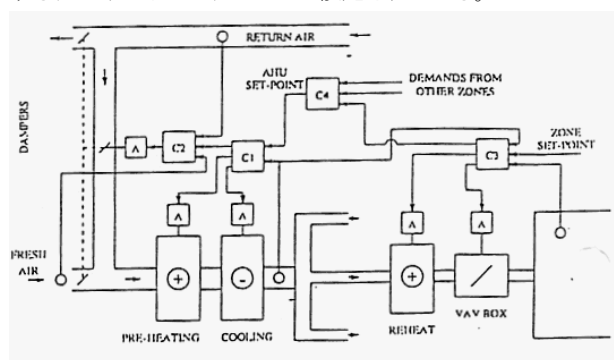


Figure 2: The control scheme. The circles represent temperature sensors and the squares labeled 'A' represent the actuators.

コミッショニングのテスト

制御ループの性能を掴むために、二段階のアプローチに基づいた方法が考案された。まず、テストは、HVAC プラントのたくさんの動作点で実際される。それは、設計資料で仕様となっている設定値を維持する能力があるかを調べるためである。データを分析して、設定に対する過渡応答が仕様を満たすかどうかのテストを、どの設定値で行うかという適当なテスト方法を選択するために、一連のエキスパートのルールが用いられた。過渡応答のデータは、制御ループに外乱として作用する自然や変動因子により、いくつかのデータセットに分類される。それぞれのデータセットから計算されて、性能が表示される。ふたつのエキスパートルールで表示結果が分析され、実際の性能と設計資料で仕様化された性能を比較できる。

シミュレータは、知識ベースのシステムに搭載される前の段階で、エキスパートルールを考案・チェックするために開発された。実ビルの制御のコミッショニングで起きそうな2つのフォルトをシミュレーションし

た。

(i) 空調機の冷水コイルにつながる冷凍機の出口温度設定が、夏場にもかかわらず極めて高い温度に、誤って設定された。

(ii) ターミナルボックスの最大風量が設計より下回っていた。

最初の一連のテストは、そのプラントが極端な設定値に対して能力を発揮し得るかどうかを特定するためである。図3と図4は、ゾーン温度、VAVダンパ、リヒートコイルのテスト結果で、期間とした9時間の典型データである。図3では、給気温度設定は17°Cで、ゾーン温度設定は24°Cである。図4では、それぞれ10°Cと24°Cになっている。両方の場合とも、ゾーン温度の制御偏差は平均するとゼロに近い値であり、両方のとも操作量が最大値にまで達することはない。ゾーン温度の制御ループの性能は、必要な動作条件を満たしていると結論できる。

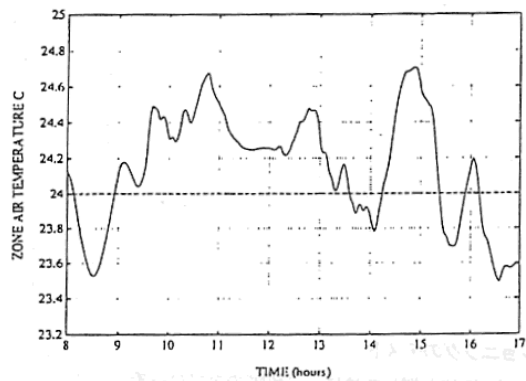


Figure 3: Regulation test with maximum supply air temperature

2番目の一連のテストは、制御ループの過渡応答を調べるためである。具体例として、設定値を20°Cから24°Cにあげた後で、24°Cから20°Cに下げた時の過渡応答を

図5に示す。給気温度設定は、テスト中は10°Cに固定されている。午後の長い間に渡って、操作量が最大値に達して、空調機が給気温度設定値に届いていない。

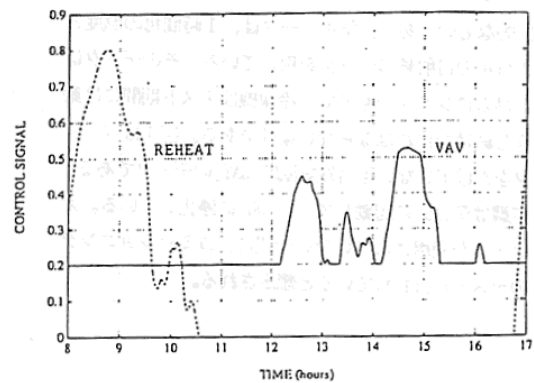
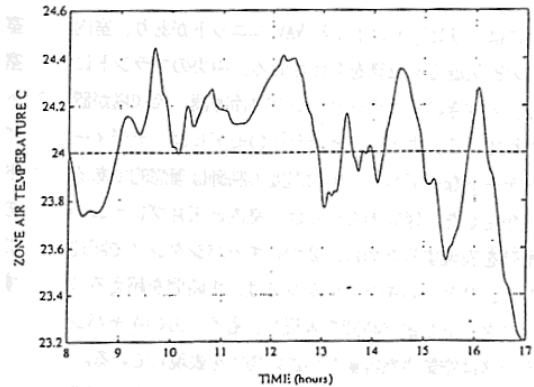


Figure 4: Regulation test with minimum supply air temperature.

VAV への操作信号も最大値に達して、その際に、ゾーンの温度設定が下げられたことで発生する冷房負荷変動を満たすことができなくなっている。その結果、ゾーン温度が新たな設定値に達するまでに、長時間を要している（温度が設定値の1°C以内に整定するまでの時間は30分以内とするのが一般的なのだが、テスト結果は30分と70分となった）。最初の観察では、冷凍機の出口温度設定が高すぎたという推測となり、2番目の観察では、ダンパは全開にもかかわらず風量が足りていないという推測となった。

図6に、フォルトが矯正された後にテストが繰り返されたときの制御システムの挙動を示した。冷凍機の冷水出口温度設定の変更幅は5°Cから2°Cに減らされて、ターミナルボックスの最大風速は6.2m/sから8.0m/sに増えた。

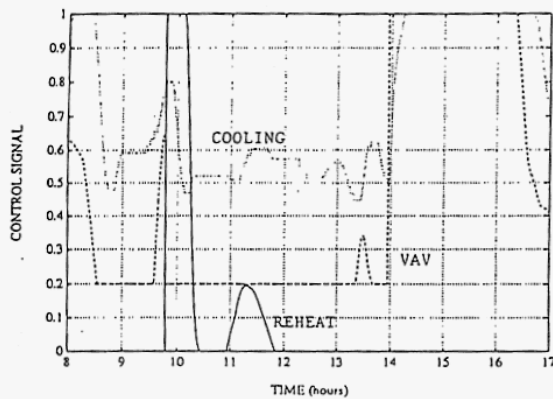
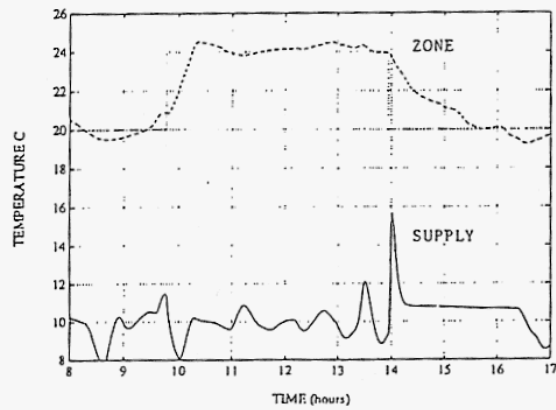


Figure 5: Transient test when faults are present

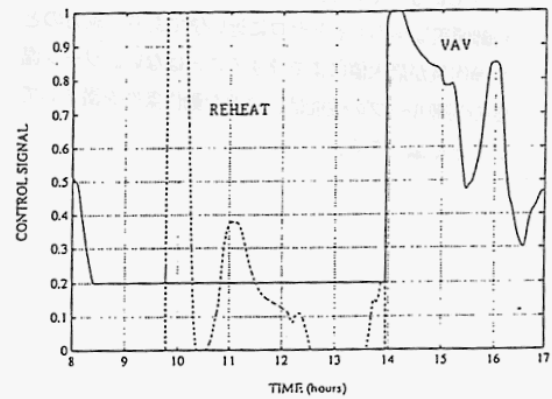
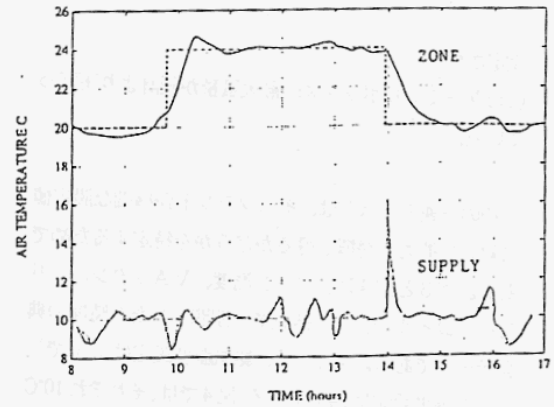


Figure 6: Transient test when faults are corrected

このゾーンの温度制御コントローラのコミッショニングは、今では成功の結果をおさめ、追従の速度と計測温度と目標温度の偏差の両方とも、仕様の範囲を満たしている（一般的なゾーン温度制御の仕様は設定値に対して1°C以内である。ここでの設定値をあげた時と下げた時の2乗ルート平均誤差はそれぞれ、0.21と0.26°Cになった。）

結論

ビルシミュレータの使用により、フォルトを即座かつ安全にシミュレーションでき、コミッショニング中におきる様々な動作モードを、繰り返し定義して制御させることができる。適当なレベルでビルやプラントのモデルが構築できれば、信頼できる結果が得られる。自動コミッショニングでは、異なるテストの結果の結合や異なる指標のトレードオフ、実性能と仕様性能との比較に対して、性能基準や方式の開発の注意深い選択が必要である。それは、不確実性や、意志決定のプロセスを伴う主観的な特性を扱うことである。計測し

ていない外乱があれば、センサを追加して計測しなくてはならない、そして、これらの外乱がプラントの動作に影響がないことを示すデータを集めなくてはならない。

謝辞

筆者らは、ビルのシミュレーションのセットアップと実行を行ってくれたDr P Haves氏に感謝の意を表す。