

## HVAC制御システムの自動コミッショニング

A.L. Dexter, P. Haves, D.R. Jorgensen (1993)

### サマリ

コンサルタントエンジニアやコントラクタ、制御メーカーは協力をしながら、HVAC 制御ループを自動コミッショニングする手順について調査・研究してきた。この論文では、空調機のオープンループテストやクロズループテストを取り上げる。オフィスビルをモデルとした空調シミュレーションと実ジョブでのマニュアルテストを行った。冷水コイルの不適切な特性を発見するために、自動コミッショニングのデモンストレーションを行い、空調機のクロズループの制御性に悪影響を与えることを実証した。結論として、実践的な自動コミッショニングプロセスに関わるキーポイントを論じた。

## 1 イン트로ダクション

ビルの環境制御で満足な結果が得られないのは、設計よりむしろ、不適切な運用が原因となっていることが多い。大抵の場合、この不適切な運用は、HVAC システムのコミッショニングがうまく行われていないことに端を発する。建築設備業界では、コミッショニングのスタンダードをより良くするために、多くの実践的な取組みがあったが、実際のところ、次のような理由により、コミッション作業は改善に到らなかった。

- ・建物自体の建築スケジュールの遅延により、コミッショニング期間が短縮されてしまう。
- ・コミッショニング作業を実施できるスキルをもつ作業者が不足している。
- ・性能や動特性を仕様としてうまく表現するのが困難である。
- ・居住者がいない状態でかつ、ある短期間で、HVAC システムのすべてのテストを網羅するのは困難である。

コミッショニングのルーチンな作業を自動化すれば、上記の問題の改善が可能となろう。異なるシステムでの平行した自動化が可能になるおかげで、作業者は自動的に発見されたフォルトに対処することに注力できるわけである。さらに、ビルオープン後のリコミッショニング作業にも役立つであろう。

本論文では、HVAC 制御ループのコミッショニングを自動化する手順を研究した。空調機コミッショニングのための一連のオープンループテストとクローズループテストを記述する。テストはオフィスビル空調システムのコンピュータシミュレーションを使って開発され、実ビルでのマニュアルテストにより評価した。不適切な特性をもつ冷水コイルを発見し、空調機のクローズループの制御性に悪影響を与えることを示すことで、自動コミッショニングの能力を実証した。

## 2 テスト手法の考案

HVAC 制御システムには次の2つの要求側面がある。

- ・仕様として明記された性能の達成
- ・想定されるフォルト要因を根絶すること

ふたつの事項は意味的には同じだが、実際は補完的な関係となる。要求性能と想定されるフォルトを抜けなく網羅するのは無理だからである。とりわけ、明記された仕様が、設計条件以外での要求性能を定義することはまれであり、制御システムが排除しなければならない外乱の特性や厳しさを明示する可能性は少ない。

### 2. 1 オープンループテスト

オープンループテストは、個々の設備やサブシステムに関わる制御変数と制御信号の間の、静的と動的な両方の特性を、チェックするために行われる。想定されるあらゆる動作点やモードのすべてシステムが正しく動作するかをテストするのは現実的でないので、一連のもっとも一般的で重要なフォルトがないことを実証するようなテストがシステムに対しておこなわれる。

ビルの制御システムにおいて、望ましいテスト条件を達成するためにセットアップされ、テストされる制御ループは手動モードに切り替えられる。コントローラにつながるアクチュエータは、事前に設定されたテストシーケンスで駆動され、そこでのテストデータは制御システムを介して収集される。アクチュエータへのシーケンス信号は、一連の要求されるステップ入力となる。ステップ数は、そのコンポーネントの応答を特徴づけるのに必要な詳細レベルや外乱に対する応答のサイズ、テストにかける時間などの要因で決る。

ステップ入力の振幅は、そのコンポーネントのプロセス特性の大まかな形態を事前知識を反映する。テストが可能かどうか、テストを行う価値があるかどうかを決めるためには、事前の様々なチェックが不可欠である。空調機の冷水コイルや温水コイルでは、事前に次の二点をチェックする必要がある。

- ・ 給気風量が十分であること
- ・ 入口空気と入口水の間十分な温度差があること

ミキシングボックスのテストでは、外気温度と還気温度の差が十分であることが必要である。データ収集の周期は、制御系の動特性とコントローラの周期や通信速度で決定する。生データは離散データとなる。まずは、センサの読み値はノイズを軽減するためのローパスフィルタを通過した信号となる。次に、適切なセンサからの読み値の変動がプロセスが安定とするのに十分低いかである。オープンループテストの結果を分析する手順ではこの過程でなされている。直接計測ではなくても、関連する計測値から推定できれば、予想値を活用することも必要である。混合空気温度と給気温度からコイル前後での温度変化を計算するために、給気ファンでの温度上昇を想定するは、その簡単な一例である。

## 2. 2クローズループテスト

クローズループのテストでは、安定性、外乱への強さ、設定への追従性を確認することが目的である。実際は、ビルがオープンする前の非居住状態では外乱は小さい。そのため、制御性能の検証は、設定値への追従性に的が絞られてしまっている。

空調制御システムは、望ましいテスト環境になるように最初はセットアップされる。二つの設定値が選ばれ、最初は第一の設定に固定される。そして、コントローラがその固定された設定値を維持できるかどうかチェックするために、オンラインのデータモニターが行われる。追従した後もモニターするのは、定常偏差がどれくらいかを判断するためである。その後、第二の設定値に移行して、制御性が確認される。再び第一の設定値移行にして、制御性の確認を行う。測定ノイズの影響を減らすためにローパスフィルタが再度使われる。

## 2. 3テストデータの分析

[4.5]の実践事例の知識データベースに基づくエキスパートシステムでテストデータは分析される。この知識データベースのプロトタイプバージョンは、正しい動作の証しとなる一方で、次の6グループのフォルトを導き出す。

### ・グループ1

ダンパとアクチュエータのリンケージの破損やアクチュエータの焼け焦げ。  
兆候→操作信号が変化しているにもかかわらず、制御量が変化しない。

### ・グループ2

誤ってスイッチが逆動作している、リンケージが逆接されている。  
兆候→操作信号の変動に対して、制御量が反転動作している。

### ・グループ3

サイジングミスバルブ、不適切な特性のバルブ  
兆候→操作量に対する制御量の特性がリニアから逸脱する

### ・グループ4

ダンパブレードの破損、バルブポートへの異物付着  
兆候→全閉なのに、リークが発生してしまう。

- ・グループ5

コントローラの不適切なコンフィギュレーション、設備の能力不足  
兆候→制御が設定値を維持できない。

- ・グループ6

コントローラの設定ミス、不適当な制御方式  
クローズループでの追従性が悪い

テストデータセットは、主な特徴を表す少数の数値に集約される。温度制御系では、温度計測値がプロセスで使われる供給側と放熱側の温度を使って正規化される。冷水コイルの場合では、空調機の入口温度と送水温度に該当する。(特徴と呼ばれる) 定量的な計測値は、フォルトであるのか、正常な動作なのかという、定性的な判断に通じるわけである。正常な動作の特徴とフォルトの特徴を区別することが必要である。ここで特徴は、プロセスの専門知識を使って選ばれた。

オープンループでの静特性には、次の4つの特徴で述べられる。

- ・最小絶対レンジ (ノイズに対して上回る信号レベルの値)
- ・正規化ゲイン (動作範囲の値)
- ・全閉時誤差 (バルブやダンパ全閉時のリーク量)
- ・曲率 (非線形性)

クローズループでは、外乱のもとでも設定値を維持するためのコントローラ的能力を表すために、次の3つの特徴が使われる。

- ・操作信号の逸脱 (上下限にはりついている時間の割合)
- ・制御変数の動き (設定値付近でのハンチングの振幅と周期)
- ・偏差の絶対値 (オフセットエラー)

更に、設定変更に対する過渡応答特性を述べるために、次の2つの特徴が使われる。

- ・制御変数の逸脱 (整定時間)
- ・制御信号の逆動作 (系がサイクルする回数)

正常動作やフォルトの兆候をどう言語表現するかを定義しておき (例えば、この系の特性は非線形である)、定量的に表現されるものは、何か兆候につながると連結させておく。IF-THEN のルールで、フォルトがあるかないかの度合いを決める。以下に、その例を挙げる。

IF プロセスの特性が非線形である

AND 正規化ゲインは十分大きい

AND 最小絶対レンジは適当である。

THNE グループ3のフォルトが現れる。

このルールでは、テストデータの質や潜在的なフォルトが、別の兆候を部分的に隠蔽する可能性を考慮している。

このエキスパートシステムでは、言語表現の曖昧さを考慮したファジーベースの推論エンジンを使うことで、ルールと観測システム間に起こるマッチの予測レベルを、結果の信頼度と併せて、ユーザーに提供する。特定のテストを分析することは、「挙動が正しい」、「何かフォルトがおきている」、「このテストでは結論できない」、といういずれかになる。

もし、「挙動が正しい」であれば、次のステップに進む。もし、「このテストでは結論できない」となれば、繰り返しテストを行う。さらに、「このテストでは結論できない」であれば、違う条件でテストを行うようにする。オープンループのフォルトが起きているという結果に対しては、想定されるフォルトの原因をリスト表示する。クローズループテストでは、コントローラの再調整が必要となることを示す。

### 3 テスト結果の事例

#### 3. 1 オフィスビル空調シミュレーションでの自動コミッショニング

モジュラーシミュレーションプログラムの HVACSIM+を用いて、3ゾーンに給気する空調機からなる VAV 空調のコンポーネントベースのシミュレーションを構築した。冷水コイルと三方弁の合成特性を図1に示す。選定が正しく行われた指数（イコールパーセント）特性のものと、間違っ選定されたリニア特性の2つがある。冷水コイルのオープンループテストを行った結果をテーブル1に示す。エキスパートシステムは、正常に動作した結果に対してあいまいな結果を出力した。バルブ自体が理想的な特性だとしても、わずかにオーバーサイジングなため多少の非線形特性となっている。しかし、正しくない特性の冷水弁では、高い信頼性で検出された。

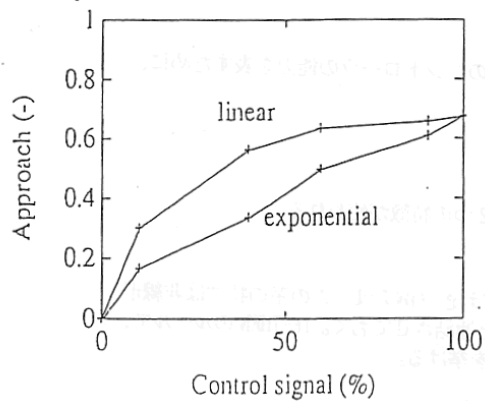


Table 1: Open loop tests on simulated cooling coil

		Correct charact	Wrong charact
Features	Min abs range (°C)	12.9	12.5
	Normalised gain (-)	0.67	0.67
	Turn-off error (°C)	-0.04	-0.04
	Curvature (-)	1.45	3.45
Normal operation	Degree	59%	1%
	Confidence (0-1)	0.55	1.00
"Stuck" fault (Grp 1)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Reverse" fault (Grp 2)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Leaking" fault (Grp 3)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Non-linear" fault (Grp 4)	Degree	41%	99%
	Confidence (0-1)	0.55	0.99

Figure 1: Process control characteristic for the simulated cooling coil

特性の正しいバルブでのクローズループテストでの過渡応答の結果を図2に、特性が正しくない場合の結果を図3に示す。冷房負荷が高い時と低い時の両方を調べるために、給気温度の設定値は12と17の間で変化している。クローズループのテスト結果をテーブル2とテーブル3にそれぞれ示す。コントローラの調整パラメータは、正しい特性のバルブと仮定し、クローズループの過渡応答が全域で合格するような値とした。コントローラのパラメータ設定条件を同じにした場合に、正しくないバルブ特性のものは、設定値が高い領域でおおきなハンチングが発生した。エキスパートシステムの場合、正しいバルブ特性ではフォルトを検知せず、正しくないバルブ特性では、冷房負荷が小さい時にフォルトを検知した。

#### 3. 2 実ビルでのテストデータの分析

アクチュエータの動作を変えることで、実際の冷水コイルの特性を、図4のような指数またはリニア特性にしてみた。

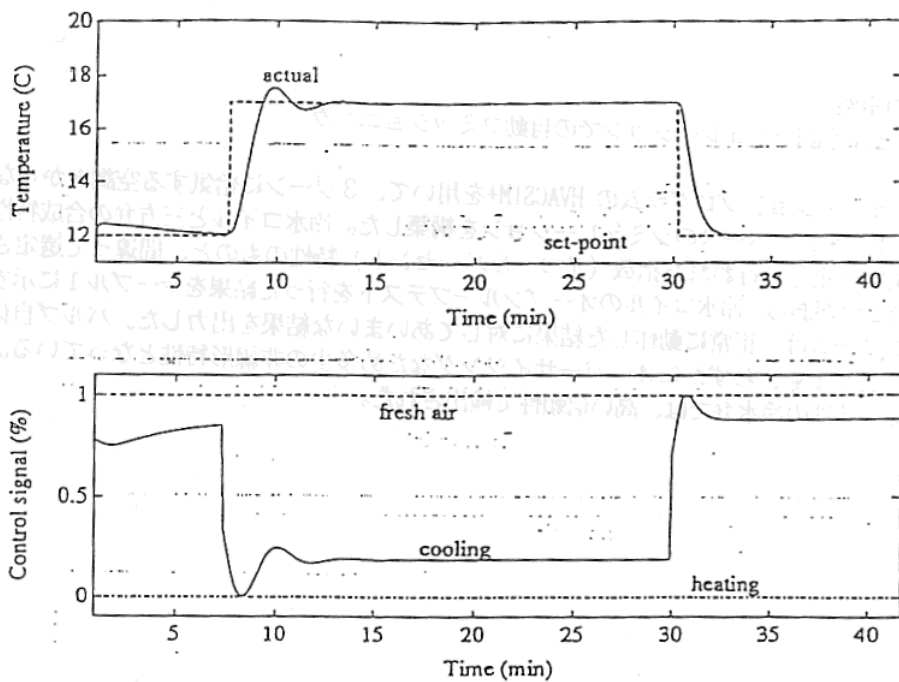


Figure 2: The transient behaviour of the simulated plant with the correct valve characteristic

Table 2: The results of the closed-loop tests (with correct valve characteristic)

		12→17°C	17→12°C
Features	Controlled variable transgression (-)	0.129	0.142
	Control signal reversals (-)	4	2
	Control signal transgression (-)	0	0
	Controlled variable abs. mean error (°C)	0.0	0.0
	Controlled variable activity (°C)	0.0	0.001
Regulation fault (Grp 5)	Degree	0%	0%
	Confidence (0-1)	0.98	0.98
Transient fault (Grp 6)	Degree	0%	0%
	Confidence (0-1)	0.98	0.98

過渡応答を図5に示す。もう一度、設定値を12~17°Cの間で変動させた。テーブル5は、エキスパートシステムでのクローズループテストの結果である。

レギュレーションを満足している際でも2つの設定値に対して小さな定常偏差が生じている。過渡応答は運転条件によって変わってくる。設定値を高くすると、コントローラは一時的に温水弁を開いてしまい、最初のほうでオーバーシュートを発生させてしまう。設定を低くすると、冷水弁は一時的に飽和して、オーバーダンプとなってしまう。エキスパートシステムでは、設定値が低い時には過渡応答とレギュレーションのフォルトは発生しないが、高い設定値の時には過渡応答とレギュレーションのフォルトとも発生するかもしれないという結果となった。

なお、3件の実ビルにおけるオープンループとクローズループのテストは[7]にすべて網羅されている。

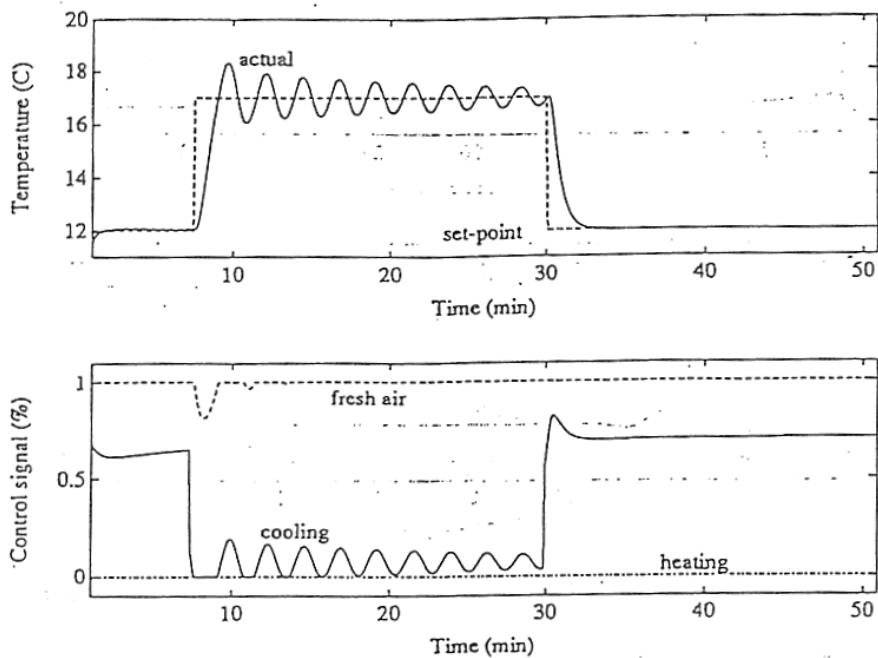


Figure 3: The transient behaviour of the simulated plant with the incorrect valve characteristic

Table 3: The results of the closed-loop tests (with wrong valve characteristic)

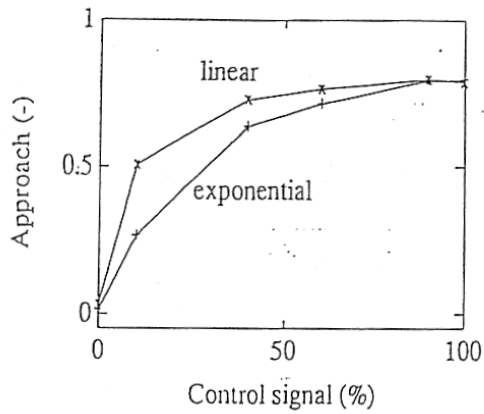
		12→17°C	17→12°C
Features	Controlled variable transgression (-)	0.121	0.138
	Control signal reversals (-)	25	2
	Control signal transgression (-)	0	0
	Controlled variable abs. mean error (°C)	0.090	0.003
	Controlled variable activity (°C)	0.560	0.001
Regulation fault (Grp 5)	Degree	0%	0%
	Confidence (0-1)	0.98	0.98
Transient fault (Grp 6)	Degree	80%	0%
	Confidence (0-1)	0.98	0.98

#### 4 結論

シミュレーションと実ビルでのテストは、応用が期待できる技術であることを示すと同時に、自動コミッショニングで現在発生している問題を軽減しようとする前に、考慮すべき実践的な事象を明らかにした。

コミッショニングの過程では、コミッショニングエンジニアと密接に情報交換することが必要である。特別なテストを行うかどうかは難しい複雑な問題である。動作している環境、以前のテスト結果、他のサブシステムの利用可否などを考慮しなくてはならないからである。遠隔の計測が不可能な場合や信頼性が低い場合では、手動でデータ入力が必要となるかもしれない。元の仕様が不完全や不十分であることもあるし、特殊な環境にあうようにオンラインでの修正せねばならないこともある。テスト中にときおり発生する顕在しない外乱は許容されねばならない。

Table 4: Open loop tests on a cooling coil in a real building



		Correct charact	Wrong charact
Features	Min abs range (°C)	14.0	13.9
	Normalised gain (-)	0.78	0.75
	Turn-off error (°C)	0.19	0.46
	Curvature (-)	1.35	2.13
Normal operation	Degree	74%	1%
	Confidence (0-1)	0.65	1.00
"Stuck" fault (Grp 1)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Reverse" fault (Grp 2)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Leaking" fault (Grp 3)	Degree	1%	1%
	Confidence (0-1)	1.00	1.00
"Non-linear" fault (Grp 4)	Degree	27%	99%
	Confidence (0-1)	0.65	0.99

Figure 4: Process control characteristics for a real cooling coil

#### 5 ACKNOWLEDGEMENT

本研究は、BICC plc , Building Research Establishment, Haden Young Ltd, Ove Arup Partnership と共同であり、Science & Engineering Research Council と Department of Trade & Industry の出資である VACR LINK program の一環である。筆者らは、ビルのシミュレーションモデリングに於いて David Oritchar 氏に、実ビルでのデータ収集に於いて Colin Shuricity 氏に、助言や提案を頂いたプロジェクトプランの委員会のメンバに対して、感謝の意を表す。

Table 5: The results of the closed-loop test in a real building

		12→17°C	17→12°C
Features	Controlled variable transgression (-)	0.25	0.15
	Control signal reversals (-)	6	5
	Control signal transgression (-)	0	0
	Controlled variable abs. mean error (°C)	0.55	0.35
	Controlled variable activity (°C)	0.1	0.1
Regulation fault (Grp 5)	Degree	3%	0%
	Confidence (0-1)	0.88	0.98
Transient fault (Grp 6)	Degree	6%	0%
	Confidence (0-1)	0.19	0.98



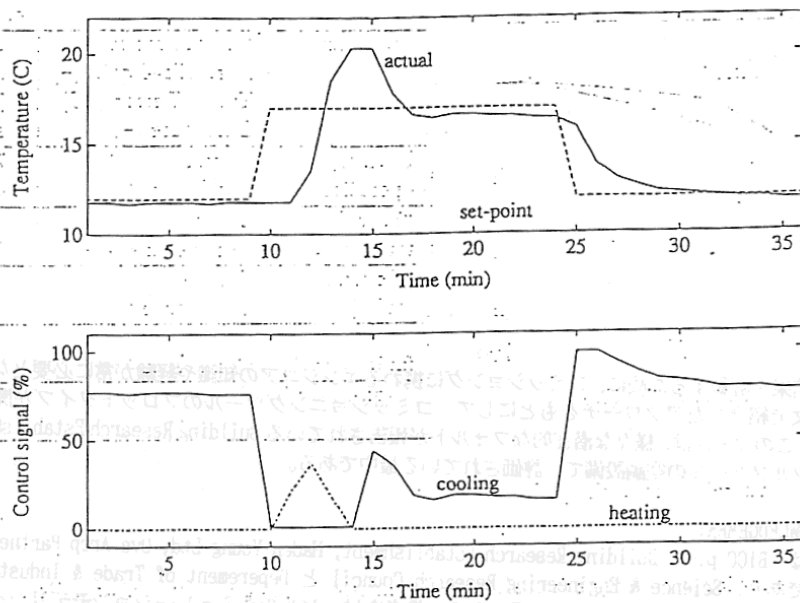


Figure 5: The transient behaviour of the real plant with the correct valve characteristic

#### REFERENCES

- [1] D Tong. Intelligent and healthy buildings. In *Proceedings of Designing for Environmental Quality 89*, Solihull, 1989. Birmingham Polytechnic/RIBA.
- [2] P Pike and K Pennycook. Commissioning of BEMS — a code of practice. Technical Report AH 2/92, Building Services Research and Information Association, Old Bracknell Lane West, Bracknell, Berkshire RG12 7AH, 1992.
- [3] D R Jørgensen, P Haves, and A L Dexter. Current practice in commissioning HVAC control systems. Technical Report OUEL 1920/92, University of Oxford, Department of Engineering Science, Parks Road, Oxford OX1 3PJ, 1992.
- [4] D Anderson, L Graves, W Reinert, J F Kreider, J Dow, and H Wubben. A quasi-real-time expert system for commercial building HVAC diagnostics. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 95, Pt. 2, 1989.
- [5] J S Haberl, L K Norford, and J V Spadaro. Diagnosing building operational problems. *Journal of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 31, No. 6 (June), 1989.
- [6] P Haves, A L Dexter, D R Jørgensen, K V Ling, and G Geng. Use of a building emulator to develop techniques for improved commissioning and control of HVAC systems. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 97, Pt. 1, 1991.
- [7] A L Dexter, P Haves, and D R Jørgensen. Development of techniques to assist in the commissioning of HVAC control systems. In *Proceedings of CIBSE National Conference*, Manchester, UK, May 1993.