

Goal and Learning in Microworlds

Craig S. Miller, Jill Fain Lehman, Kenneth R. Koedinger

Cognitive Science, 1999, 23(3), 305-336

I. INTRODUCTION

- ▶ マイクロワールドにおける活動はドメインにおける教育を生み出し、育てる
- ▶ 学習結果は教育活動の環境に大きくかかっている
 - マイクロワールドで行おうとしている活動
 - 選択したゴール
- ▶ 活動文脈と教育目的との関連の問題は特に教育的ゲームで大きい
 - ゲームのゴールに妨害され、学習目標を達成できない
 - ゲームにより動機付けられよく学習する
- ◇ 本研究における提案
 - ▶ 認知理論の利用可能性の提案
 - ▶ 複雑なインタラクション経験からの学習結果を引き出せるコンピュータ学習モデルの提案
- ◇ インタラクション経験
 - ▶ マイクロワールドとのインタラクション自体と生徒が選択したゴールとの組み合わせ
 - ▶ マイクロワールドの特定のゴールと関連したトレーニングは教育学上の目的から注意をそらす
 - **Vollmeyer, Burns, & Holyoak(1994)**
 - ・ 自由探索による属性の理解
 - **Sweller et al.**
 - ・ さまざまな課題における自由探索からの優れた転移の報告
 - ▶ 目的駆動の問題解決はエキスパート理解に向けた進歩を遅らせる
 - ▶ ⇔先行研究 (**White, 1984**)
 - 課題指向の交互作用の利用を支持する
 - マイクロワールドの関係のある側面に焦点を保たせる
 - ▶ 適切に定義されたゴールは教育上関係のある側面に焦点を当てさせる
 - ▶ 不適切なゴールは教育上関係のないことに焦点を当てるように要求する
- ◇ マイクロワールドにおけるゴールの理解と達成に必要な知識を詳細にする必要がある
 - ▶ 生徒の学習とパフォーマンスのコンピュータモデルの構築, 分析
 - インタラクション前の生徒の持っている知識と使用方略に関して仮定の明らか

にする必要がある

- 仮定された学習のメカニズムを明らかとし、プロセスの観察を可能とする
 - 既存の知識の寄与と新しい知識の獲得を明らかにする
- 最初の知識，方略知識がどのように変化したか，また，マイクロワールドの特徴がそれらの学習にどのように影響したかを探索できる

◇ 本実験では Electric Field Hockey (EFH) に焦点を当てる

- ▶ 自由に動く帯電物 (puck ; パック) を固定された他の帯電物の影響で動かす (Figure 1)

◇ 目的

- ▶ なぜゲームで定義されたゴールを追い求めることは学習を妨げるのか理解すること
- ▶ 学習が必ず明確なゴールに妨害されるかどうか
 - もしそうでないならマイクロワールド教育で良い結果を得るための明確なゴールの条件とは？

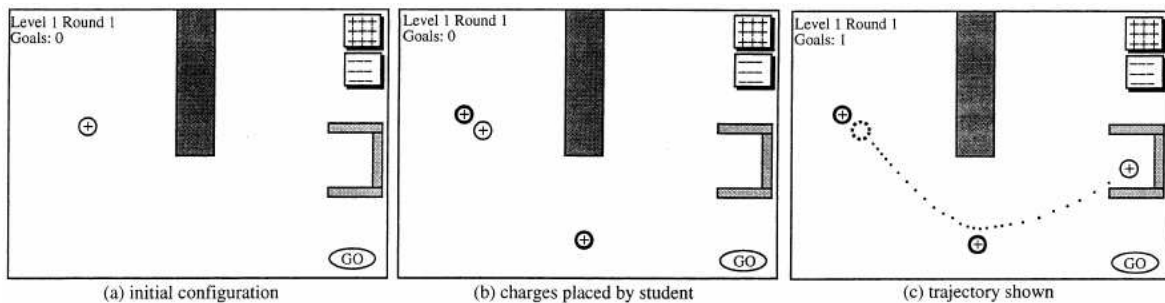


Figure 1. An example of simple interactions with Electric Field Hockey.

II. THE INTERACTIVE MICROWORLD: ELECTRIC FIELD HOCKEY

◇ EFH の教育的な目的

- ▶ 物理の学生に帯電物の質的な相互作用についての直感的な感覚を与えること
- ▶ 教育的に顕著な関係を明らかにする
 - 力と加速の関係
 - 帯電物の距離と力の効果の関係 (逆 2 乗)
 - いくつかの帯電物の位置と正味の影響 (net effect) の関係 (重ね合わせ)

◇ 障害物をよけてゴールに自由帯電物が入るようにする

- ▶ 生徒は追加の帯電物 (正負どちらでも可能) を固定する
- ▶ 結果の経路を点線で描写→速度も知ることができる
- ▶ クリアしていくと難しくなる (~6)

III. ASSUMPTIONS ABOUT KNOWLEDGE AND LEARNING IN THE MODEL

◇ EFH-Soar

- ▶ EFH を行っている 8 人の物理学生の観察を元にしたモデル
- ◇ 目的
 - ゲームの目標に合わせる必要があるプレイ方略の理解
 - それらの方略が教育上関係する関係性によって決まる程度の理解
- ◇ モデル構築のための仮定
 - ▶ 生徒はパックがネットへ向かうように帯電物を置いたり，調整したりする
 - ▶ ゲームの目的を超えた熟考（学習のための）はしない
- ◇ Soar 構造の学習仮定に基づく
 - ▶ 学習は問題解決中のサブゴールの解決の結果として起こる
 - ▶ 獲得された知識構造は解決に用いられた文脈の手がかりにより索引付けされる
＝エピソード学習（episodic learning）は直近のゴールの達成のサイドエフェクトとしてのみ起こる
- ◇ アプローチ
 - ▶ 先行研究（Conati & Lehman, 1993a, 1993b）の修正と EFH におけるモデリング
 - ▶ 先行研究からはずれる 2 つの特徴
 - － ナイーブな事前知識に付属する質的ヒューリスティックの分離
 - － マイクロワールドのゴールを達成するために必要とされる情報から引き出される学習に限る
- ◇ EFH・Soar の能動的学習仮定は Sweller の主張と対照をなす
 - ▶ EFH・Soar
 - － goal-oriented な問題解決の文脈で自動的に学習が起こる
 - ▶ Sweller
 - － goal-oriented な問題解決は学習への注意をそらす

IV. DESCRIPTION OF KNOWLEDGE, PROBLEM SOLVING, AND LEARNING IN THE MODEL

- ◇ モデルの初期知識の適応と新しい知識の獲得を例で示す
- ◇ 最初の知識＝p-prime（phenomenological primitive; diSessa, 1993）
 - ▶ 生徒が導入するナイーブな知識
 - － パックと同じ電荷の固定された帯電物は帯電物同士を結んだ直線状に最初の一押しをする
 - － 自由に動く帯電物の経路は同じ属性の帯電物に湾曲される
 - － 近い帯電物のほうがより影響する
- ◇ 注目点

- ▶ 問題解決中に学習結果の何がそれらの知識に適用されるか
- ☆ ゴールは2つのサブゴールに分かれる
 - ▶ 最初に動かすこと
 - 同じ属性の帯電物をパックの後ろに置く
 - ▶ 軌道を曲げること
 - 同じ属性の粒子を置く
 - ▶ 日常生活からの考え
- ☆ 予想通りには進まずに調整が必要になる
 - ▶ 日常スキーマは適切な距離を提供しない
 - ▶ EFH とのインタラクションにより質的スケール知識（ゲームのパラメータ）を推論する
- ☆ どうやって知るようになるのか？
 - ▶ 置き方の違いと結果の関係を内面化

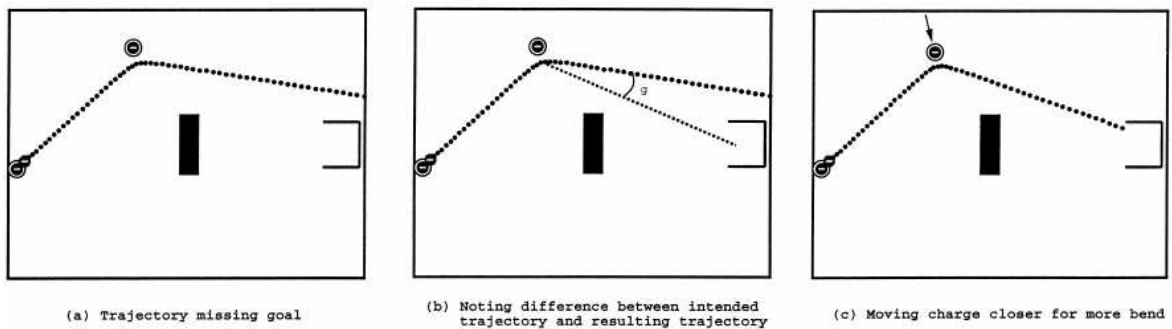


Figure 4. Game success through charge adjustment.

- ☆ 設置と調整から潜在的に何を学ぶか？
 - ▶ 大体の距離の知識
 - 教育的に関連のある知識
 - ・ 近い＝最も力が大きい＝変化が大きい
 - ・ 遠い＝力が弱い＝変化が小さい
- ☆ 学生は実際に何に気付いて学習しているのか？
 - ▶ フィードバックにより，ゴールとの差を小さくするように現在の帯電物の調整する
 - モデルは実際の軌道と目標の軌道の角度の差をフィードバックとして検出する
- ☆ モデルは多くの方略を含む追加的な問題解決（差を小さくする）に従事しなければならない
 - ▶ モデルは軌道の近くへ帯電物を動かすことは差を小さくすることを達成するという知識を利用する
 - サブゴールの達成
- ☆ サブゴールの達成によって Soar はチャンクと呼ばれるルールの形で自動的に新しい知

識構造を作る

- ▶ 構造によって何が定期的に支持されるのかということのほか追加的な処理は必要とされない
- ▶ 単純化された結果のチャンク (Figure 5)

```
IF charge is 5 units away from path vertex
```

```
AND puck trajectory did not bend enough (wrt Angle g)
```

```
THEN move charge 1 unit closer to path
```

Figure 5. A chunk created from charge adjustment.

- もし帯電物がパスの頂上から 5 ユニット離れていて、パucksの軌道が十分に曲がっていないなら、帯電物を 1 ユニット分パスの近くに動かせ
- ☆ チャンクの獲得はパフォーマンスを 2 つの方法で促進する
 - ▶ 条件により描写された状況が何度も起こることにより、チャンクはすぐに発火するようになる
 - ▶ 結果が予測できるようになる
- ☆ 単純な問題解決を通して EFH-Soar は距離の知識を獲得する
 - ▶ 生徒の適切な距離の推論能力の増加に一致する

V. CLAIMS OF THE MODEL

- ▶ エピソード的な知識に限られる時、モデルは役に立つ主張を形成する
- ▶ 調整が必要とされない時には何も学習されない
 - 一度でゴールが達成される
- ☆ 調節方略によるもう 1 つのエピソード知識の内容についての主張
 - ▶ 軌道と元の帯電物の位置の知覚が必要 (Figure6)
 - ▶ 角度 g と方向の変化に示される角度 (角度 a) の比較
 - ゲーム指向的な視点 = 角度 g に注目 (Figure 5 のチャンク)
 - 教育学的な視点は角度 a により示される情報をゲームとは独立して考える
 - ▶ 後者の視点では以下の 2 つをコーディングする
 - 固定された帯電物と軌道の距離の関係における方向の変化の程度
 - 固定された帯電物に最も近いポイントでもっとも方向を変化させる
→ 帯電物の位置と方向の変化の間の推論の可能性がある
 - ▶ 似た文脈において、これらの変化をコード化することは最終的に帯電物の力は距離に伴い急速に減少することを明らかにする
- ☆ 教育学的な視点があったとしても、似た文脈の比較は保障されていない
 - ▶ 学習された構造は関係のある文脈的な情報 (e.g. 速度) に欠ける

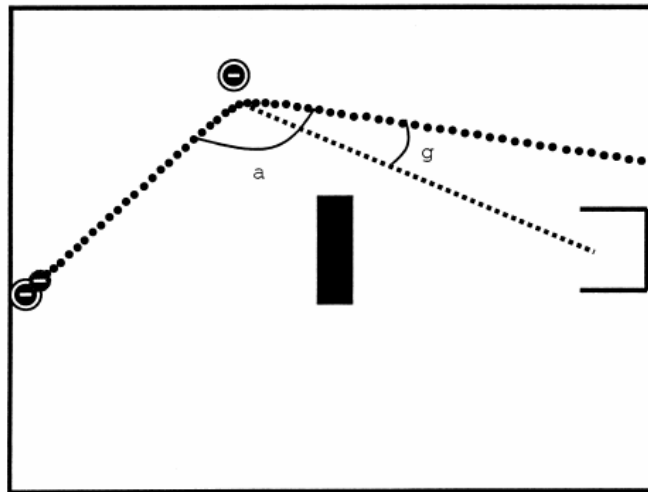


Figure 6. The goal-oriented angle (g) and the angle showing acceleration (a).

- 力と速度の関係の推論を不可能にする

◇ 他の調整法略

- ▶ 新しい推進させる帯電物を軌道の最後のほうに置く (Figure 7)

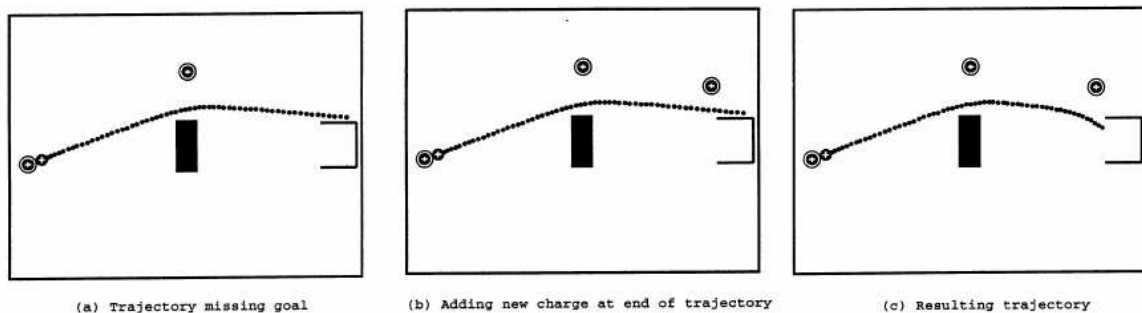


Figure 7. Game success by placing a charge near the end of the trajectory.

- ▶ 帯電物の元の位置を記憶する必要がないので、モデルはこの方略を適用した時に、エピソード的な知識を学習しないと主張する
- ▶ 追加的な帯電物を置くことは全体の軌道を少し変える
 - 複数の帯電物による正味の影響を明らかにする
- ▶ モデルはエピソード記憶ではこの軌道の最初のほうの違いは注目されず、コード化されないと主張する
 - > 遠くの帯電物による影響の獲得に失敗する
- ▶ Sweller (1988)
 - 調整方略を選択することは means-ends analysis (MEA) の適用
 - ・ MEA の適用はより大きな認知負荷を必要とするため、学習を妨害する
- ▶ EFH-Soar は対照的なセオリーを提案する
 - 学習は問題解決の際に定期的、自動的に起こる

- ドメインの理解のために必要な情報が無視される
 - ・ 知識構造から教育的にターゲットにしている関係の推論のためのエピソード的な情報が欠如する

VI. PREDICTIONS OF THE MODEL

☆ モデルは EFH とのインタラクションを改善する方法を提案する

☆ no-goal 状況

- ▶ 障害物とネットがなく、特定の課題がない
 - 非本質的な活動から学習する
 - ・ 軌道にどのような影響があったか振り返ったりすること
- ▶ Sweller らの認知負荷理論による予測と一致

☆ specific-path 条件 (Figure8)

- ▶ ゴールをさらに特殊化する
 - 特定のパスを例示し、パスに沿うようにパックが動くように帯電物を配置させる
- ▶ Sweller→パフォーマンスを損なう
- ▶ ⇔2つの良い結果をもたらす
 - 帯電物と軌道との関係に再び注意を向ける必要がある
 - 距離比較がなされるような追加的な基準点を提供する
- ▶ specific path と実際のパスの誤差を示す
 - 軌道の比較は副次的な曲がる前の軌道の違いも強調する
= 距離と力の関係と、力と加速の関係の両方の推論に必要
- ▶ 遠くに置かれた帯電物による最初の軌道の微妙な変化に関しても情報を提供する
 - 最初のほうの微妙な変化により、後の部分に根本的な変化が起きることに気付く

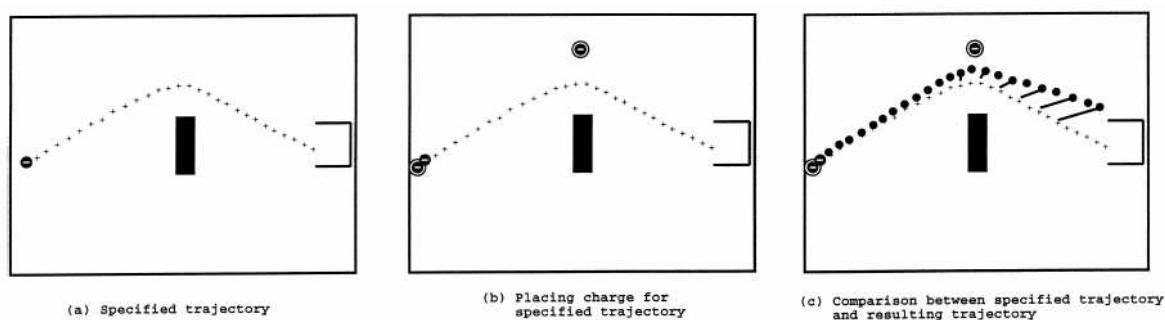


Figure 8. Specific-path condition: Specifying the intended path.

☆ まとめ (Figure 9)

- ▶ goal-dependent analysis (Miller et al.)
 - specific path も no goal も標準より良い学習を予測
- ▶ goal-directed cognitive load (Sweller et al.)

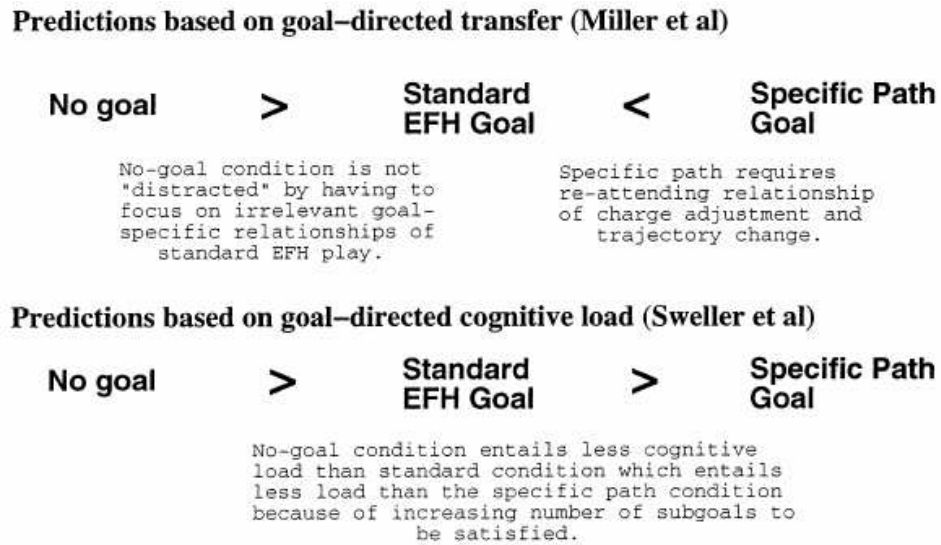


Figure 9. Predicted performance under two theories relative to standard EFH.

- no goal のみ良い学習
- specific path は劣った学習=より複雑なのでロードがかかる

VII. TESTING THE PREDICTIONS: EXPERIMENTAL DESIGN AND RESULT

★ Subjects

- ▶ 24名の学部生
- ▶ 誰もEFHが使われるelectricity & magnetismの授業をとってもEFHを行ったこともない

★ Materials

- ◇ 説明の後、1つのバージョンのEFHを行う
- ◇ ポストテスト
 - ▶ 17問の問題
 - 自由に動く帯電物の軌道予測
 - 足りない帯電物の追加
 - 4つのTF問題
 - 距離の知識、複数の帯電物の効果、力と加速の関係の理解テスト

★ Procedure

- ◇ 全被験者
 - ▶ 最初に共通の導入を行い、個々の条件に分かれる
 - ▶ 30分間、被験者はEFHとインタラクションを取る

- ▶ 30 分後、ポストテストを行う
- ▶ ポストテストの後に、全被験者は最後の問題を障害物とネットありで行う（15 分）

◇ No-goal 条件

- ▶ 障害物とネットのない EFH を行う
- ▶ 教示
 - 後に障害物とネットありの状況で行う
 - 30 分間は”実験（experiment）”を求められる
 - 目的はゲームの属性を学習すること

◇ standard-goal 条件

- ▶ 標準的な EFH を行う
- ▶ レベル 1-a から始まりだんだん難しくなっていく（レベル 6 まで）

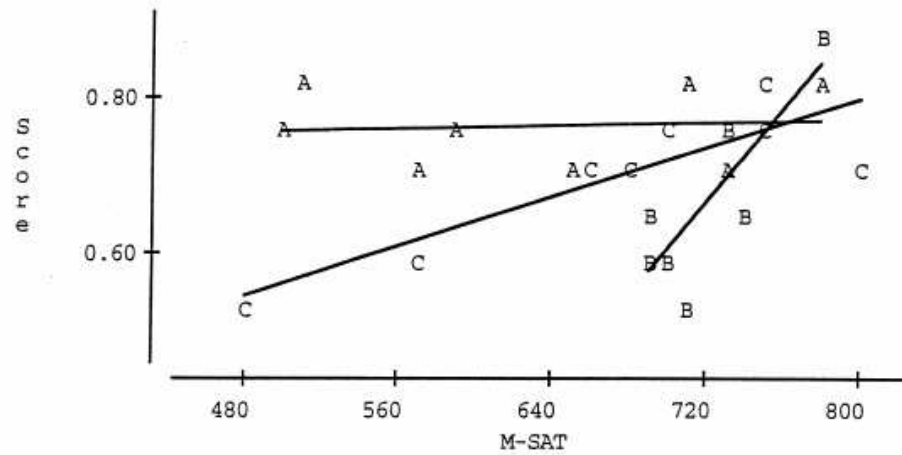
◇ specific-path 条件

- ▶ 期待される解決軌道が与えられている以外 standard-goal 条件と同様
- ▶ 追加教示
 - 解決軌道が示されている
 - 軌道に合うように配置する

★ Results

- ◇ パフォーマンスに mSAT¹ の効果あり ($F(1, 17) = 22.39; p = .0002$)
 - ▶ mSAT を共変数とする
 - ▶ 条件の効果 ($F(2, 17) = 12.90; p = .0004$)
 - ▶ 処 理 条 件 (treatment condition) と mSAT の 間 に 適 性 処 遇 交 互 作 用 (aptitude-treatment interaction) ($F(2, 17) = 8.58; p = .0026$)
- ◇ 条件ごとのポストテストの点数と mSAT の得点の散布図と回帰直線 (Figure 10)
 - ▶ no-goal 条件では mSAT の得点に関わらず良い得点
 - ▶ 他の条件は mSAT の得点が高いほうがよりよい得点
 - ▶ mSAT の得点が高い被験者は条件に関わらずよい得点
 - ▶ mSAT の得点が高い被験者は実験条件により有意な差がある
- ◇ 平均 mSAT 得点 (673) におけるポストテストの推定平均得点
 - ▶ no-goal (77%) > specific-path (70%) > standard-goal (52%)
 - ▶ 一対比較 (Scheffe 法)

¹ *Scholastic Assessment Test*、大学進学適性試験：アメリカ合衆国の高校生が大学に進学する際に受験する共通テスト m は数学 (mathematics)



A: no goal; B: standard goal; C: specific goal

Figure 10. Score versus mSAT by goal condition.

TABLE 1
Pairwise Comparisons at the Average mSAT Score

Comparison	Difference (%)	Confidence interval (%)
No-goal > Standard-goal	24.3	14.5 < δ < 34.1
Specific-path > Standard-goal	17.4	0.5 < δ < 34.3
No-goal > Specific-path	6.9	-7.2 < δ < 21.0

- no-goal と specific-path 条件は standard-goal 条件より有意に高得点 (Table 1)

★ DISCUSSION

- ◇ EFH は生徒の電氣的相互作用における物理の質的理解の発展を助ける意図がある
 - ▶ コンピュータモデルの提案
 - ゲーム指向の方略を適用したモデルが得る知識の分析
 - Soar に基づく熟考しない学習アプローチ
 - ▶ エピソード学習は即時的なゴールの達成の副作用としてのみ起こる
 - ▶ 標準的な課題が与えられるとゲーム指向なスキルを得て、EFH の能力は向上するが、ターゲットドメインに関連する新しい構造知識は得られない
- ◇ モデルをガイドとして、大きな物理の学習に導く、より specific なゴールの課題をデザインした
 - ▶ standard-goal と specific-path と no-goal の比較
 - standard-goal の参加者は他の 2 つの条件と比べて質的な物理の学習が少ない
 - mSAT の得点が中間から低いときに特に関係する
- ◇ 熟考しない学習の仮説はよく適応されている

★ Implication for Learning Theory: Knowledge Dependencies

- ◇ モデルは knowledge-dependent analysis に賛成する
 - ▶ 重要なのは外的に定義されたゴールの存在ではなく、マイクロワールドとのインタラクションにより得られる教育的ターゲット概念と知識の関係
 - goal-dependent な関係が教育的な関係と一致する時、ゴールに基づく問題解決は教育的なものに転移する

- ◇ Sweller の “goals-hurt-learning” の解釈
 - ▶ specific-path 条件における成功と対立する
 - ▶ no-goal 条件における成功と一致する
 - ▶ 知識依存の視点が no-goal 条件における成功をどのように説明するかを理解することは重要である
- ◇ 最初の予測 standard-goal < no-goal
 - ▶ no-goal 条件の生徒は関係のない、ゴール指向な関係に妨害されないため
- ◇ 知識依存の予測は認知負荷による予測と変わらない
 - 知識依存の解釈は追加的なテストを必要とする

- ◇ ポストテストを 2 つの下位得点に分ける
 - ▶ 帯電物相互作用問題
 - no-goal 条件と類似した課題
 - 知識依存仮説に従えば、no-goal 条件に最も効果がある
 - ▶ 宣言+EFH 問題
- ◇ mSAT を共変数として条件（被験者間）と問題タイプ（被験者内）の共分散分析
 - ▶ 条件と問題タイプの交互作用 ($F(2, 22) = 3.76; p < .05$)
 - no-goal 条件における帯電物相互作用問題と宣言+EFH 問題の違いは他の条件と比較して大きい (Table 2)

TABLE 2
Post-Test Subscores Estimated at Average mSAT

	Charge interaction questions (n = 9)	Declarative + EFH questions (n = 8)
No-goal	.839	.685
Standard-goal	.484	.560
Specific-path	.721	.671

- ◇ goal-specific transfer の更なる証拠
 - ▶ specific-path 条件は逆 2 乗関係の獲得をより支持する
 - ▶ 大きな方向の変化は軌道に最も近いポイントでおこるということに気づきやすい
 - standard-goal と specific-path の被験者はそれらの概念に関係するテスト問題で

どのくらいよくできるか？

- ☆ ポストテストを3つに分ける (Table 3)
 - 3,4,6,7,8,10a,10b…距離の効果
 - 11,13…加速と力の関係
 - 5,9,12,14…帯電物のネット効果 (重ね合わせ)
 - ▶ **specific-path** 状況は相対的に良いサポートを提供する
 - ▶ 特に, **specific-path** 条件の生徒は距離に関する問題で 18%もうまくやっている
 - **specific-path** 条件は微妙な変化に気付くことを要求する
 - ▶ **superposition** にも差が見られる
 - **specific-path** 条件の **superposition** の得点が高い
 - ・ 離れた新しい帯電物による追加的な効果による微妙な変化にも気付く

TABLE 3
Estimated Post-Test Means by Concept

Condition	Count	Distance (mean)	Acc*/Force (mean)	Superposition (mean)
Standard-goal	7	.439	.579	.515
Specific-path	8	.614	.593	.719

Note: Acc = Acceleration.

- ☆ ゲームに関する知識 (=絶対的な距離知識) の獲得
 - ▶ モデルのシミュレーション
 - レベル5において, ゴールのために少ない調整しか必要としなかった
 - ▶ データ
 - レベル5の転移課題において **standard-goal** 条件と **specific-path** 条件は **no-goal** 条件より解決時間が早い
 - ▶ **standard-goal** 条件がゲームに関係した学習を支持することと一致する
- ☆ **goal specificity** を学習の程度を予測するために使うことの限界を示す
 - ▶ **goal-specific** な条件はポストテストで **standard-goal** 条件より優れている
 - ▶ **standard-goal** 条件もゲーム固有の転移では **no-goal** 条件より優れている
- ★ **Implications for Instruction: Appropriate Framing of Microworld Use**
- ☆ 注意深い選択と課題の分析が不可欠
 - ▶ 単純に自分で行うか, ゴールに導かれるかだけでは十分ではない
- ☆ マイクロワールドの開発者には以下のことを明らかにする義務がある
 - ▶ マイクロワールドの使用により, どのような学習結果が预期されているか
 - ▶ どのような文脈で使用されれば, そのような結果に導くのか
- ☆ 大学生でさえゲーム的な面に熱中して, 質的な知識を得られないことがある

- ▶ エンターテイメント的な側面は必要だが，注意深い課題の選択，教師の非生産的で，ゲーム指向な方略への注意，注意深いモニタリングと方略，学習結果の評価が必要
- ☆ **no-goal** 条件は3つの条件の中で最も良かったが，最良の学習支援を提供するとはいえない
- ▶ より単純な配置を促進し，関係のあるマイクロワールドの関係を顕在的に強調することにより，生産的な時間の使用ができる
- ☆ 結果は **goal specificity** の有用性を拒否したというよりも条件づけをした
- ▶ **goal specificity** はゴールによって使われる知識と教育的目的の関係性を熟考しない場合に限られている
 - 問題解決中に熟考せずに起こる学習については説明していない
- ▶ ゴール指向の知識の分析はこの学習を説明する
 - マイクロワールド活動において，その教育的ターゲット概念の学習を支持する **specific goal** を決定するために使用することができる
- ☆ **goal specificity** の認知負荷により決定される理論的な基礎は疑問を呼ぶ
 - 本研究の結果と一致しない
 - 先行研究の問題依存の知識の転移の成功とも一致しない
 - さらに，学習と問題解決は強く結合しているという認知の統一理論とも反対
- ▶ 現象は認知負荷理論が無視できないことを支持する
 - これらの統合された学習理論の文脈においてどのように問題解決が学習を妨害するのかという説明を必要とする