

## 動作熟達を支援する無線センサネットワーク

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科  
石川 裕章 小野 真和 桧垣 博章  
E-mail: {yusho, masa, hig}@higlab.net

ユビキタスコンピューティング環境において学習の支援を行うユビキタス学習 (u-learning) 環境が実現されつつある。コンピュータを利用した学習環境は、遠隔講義や協調作業、記憶や理解を目的とした学習のように、主として動作を伴わない学習を対象に普及してきた。しかし、無線コンピュータネットワーク技術を活用することにより、動作の熟達を対象としたコンピュータによる学習支援を行なうことが可能である。本論文では、動作の熟達に対する支援を実現する u-learning システムのモデルを示す。学習者の動作データの獲得と集約を行う手法の要求条件を明確にし、学習に際し学習者に対する制約の少ない手法として、加速度センサと無線センサネットワークを利用した手法を提案し、無線センサノードの試作を行なう。

## Wireless Sensor Network Systems for Support of Acquisition of Activity Skill

Yusho Ishikawa, Masakazu Ono and Hiroaki Higaki  
Department of Computers and Systems Engineering  
Tokyo Denki University  
E-mail: {yusho, masa, hig}@higlab.net

According to advances of ubiquitous computing and networking technologies, ubiquitous learning support (u-learning) systems have been researched, recently. In conventional computer supported education systems, learning such as memorizing and understanding has been supported by using electrical textbooks and tests. Thus, this paper proposes a u-learning system architecture for supporting acquisition of activity skills such as exercises in physical education in schools. Here, wireless sensor nodes which achieve activity data of each student are critical. Hence, a prototype of a wireless sensor nodes consisting of a sensor of 3D-acceleration and a wireless communication device is developed and evaluated in learning of unicycle riding.

### 1 背景と目的

コンピュータを利用して学習を行なう e-learning は、インターネットまたはイントラネットを利用した WWW による学習方式である WBT(Web Based Training) を中心に広く普及している。WBT では、自由な時間に学習する非同期型の学習が可能であるだけでなく、双方向性や低コストという利点から、企業の研修や資格取得のための学習に広く利用され、効果をあげている。一方、動作を伴わない記憶や理解を目的とした学習だけでなく、動作の熟達を目的とする学習へのコンピュータネットワーク技術の活用に対する要求が高まりつつある。コンピュータの小型化と低価格化およびネットワークの発達にともない、ユビキタスコンピューティング環境が現実のものとなってきており、e-learning をユビキタスコンピューティング環境で行なう u-learning が注目されている。u-learning においては、学習者はコンピュータの位置に固定されない。そこで、コンピュータネットワーク技術を活用することにより、記憶や理解を目的とした学習のみではなく、学校教育における体育の授業のような多数の児童、生徒が同時並行的に動作の熟達を目的と

する学習を対象とした支援を実現する可能性が考えられる。

従来の記憶や理解を対象とした学習では、学習者が質問に対する回答を行なうことによって学習者の理解度や状態を評価し、学習計画に基づいて適切な支援を行なってきた。この質問内容は、学習者の理解度を正しく評価するものである必要があり、学習者の理解モデルに基づいて構成されなければならない。動作の熟達を支援するためには、質問と回答ではなく、学習者の動作に基づいて熟達度や状態を評価する必要がある。これを実現するためには、学習の対象となる動作の熟達モデルが必要であり、その構成には多数の熟達過程における動作データを集積しなければならない。また、学習の現場においては、学習者の動作データの取得と熟達モデルに基づく熟達度評価を実時間的に行ない、学習者に適切にフィードバックすることが求められる。このとき、学習者の行なう動作に対する制約の少ない適切な方法を用いて、学習者の動作を支援システムに入力することが重要である。本論文では、学習空間と学習者の動作に対して少ない制約で学習者の動作データを獲得可能な無線センサノード

を用いて、多数の学習者が同時に学習を行なうことを可能とする u-learning システムを提案する。また、一輪車乗車動作の学習を対象とした無線加速度センサノードの設計と試作について報告する。

## 2 関連研究

動作の熟達を目的とした学習支援システムにおいて、学習者の動作をシステムへ入力するためには、いわゆるモーションキャプチャシステムが用いられる。従来のモーションキャプチャシステムは、学習者の動作獲得手法により、以下の3種類に分類することができる。

### [光学式]

カメラを用いて学習者の動作を獲得する手法である。学習者の関節など、動作を測定する部位に対して光を反射するマーカを取り付け、学習者の動作を複数のカメラによって撮影する。撮影された映像からマーカを抽出し、その位置を計算することにより、動作を測定する。一般的に、マーカ判定の妨げになることを防ぐため、学習者の服装と撮影環境に対しては、光を反射しないような配慮が必要となる。カメラの死角に位置するマーカの測定ができない、マーカとして判定された部分が実際にどの位置に取り付けたマーカであるのかという判定が難しい、といった問題があり、このため、多数の学習者を同時に支援することは不可能である。また、学習者の周囲に複数のカメラを配置することが必要であり、カメラ配置の精度は測定の精度に直接影響し、また設置には数時間から一日という長時間を必要とすることから、一般的に専用のスタジオで実施される。このため、通常の学習環境での実現は困難である。

### [磁気式]

学習者に磁気マーカを装着し、磁場を発生させる装置を設置することによって動作を測定する手法である。機敏な動きの獲得には向かず、また磁界に影響を与えることから、多数のマーカを取りつけることができない、金属製の物体を利用することができないという制約がある。また、光学式と同様に、設備設置の問題から専用のスタジオにおいて実施されるため、通常の学習環境で利用できず、また多数の学習者に対する同時支援ができないという問題が存在する。

### [機械式]

学習者の動作を測定する装置を学習者に装着する手法である。動作の測定には、関節の動きを測定するポテンションメータなどが利用される。学習者に対して、直接測定装置を取り付けるため、学習者の動作を妨げない程度に小型軽量化された装置が必要とされる。光学式のように環境が測定する手法では、同時に学習可能な学習者数は、利用可能な専用の測定環境に限られる。しかし、機械式のように環境が測定しない手法においては、環境による制約が無いことから、場所を問わずに利用することが可能であり、また、他の手法と異なり、測定データが学習者のどの計測点のデータであるのかを一意に特定可能であることから、多数の学習者を同時に支援することが可能である。しかし、測定データを記録装置まで配送する機構を備えない場合は、装置内に記憶したデータを学習時間外に取り出すことになり、測定データを実時

間活用することは不可能である。

一方、多数のセンサノードの測定データを収集し、活用するためのセンサネットワークの研究開発が活発に行なわれている [2]。特に人間生活の場において、人間の諸状態を観測するユビキタスセンサネットワークの技術検討が行なわれている。センサを身体に装着し、体温、血圧、心拍数、脈拍などを測定し、健康管理を支援するシステムとして Vivago WristCare がある [6]。ここでは、センサノードを手首に装着し、定期的にセンサノードをインターネットに接続して、蓄積された測定データをサーバコンピュータに転送する。これは、動作データに比べて時間変化の小さな測定データを対象としているため測定インタバルが大きく、サーバコンピュータへのデータ転送も実時間性を要求されない。また、運動軌にセンサを装着し、距離、速度、消費カロリーを計測するシステムが提案されている [7]。ここでは、センサデータを無線通信によってモバイルコンピュータに転送する手法を用いている。システム構成は本論文と類似するものであるが、多数の学習者に対する少数の指導者の教示を支援するという学習環境を対象としていない点が異なると考えられる。

## 3 提案手法

### 3.1 熟達支援システム

動作の熟達を支援するためには、その動作の熟達モデルを構成し、学習者の動作データを熟達モデルに基づいて評価することが必要である。そこで、熟達支援システムを、熟達モデル構成サブシステムと評価教示サブシステムによって構成する (図1)。熟達モデル構成サブシステムでは、試験学習者の熟達過程における動作データを取得し、集積された動作データに基づいて熟達モデルを構成する (図2)。ここで一般に、動作の熟達度は学習時間に比例して向上するものではなく、さらに、局所的には熟達度が単調増加することさえ保証されない複雑なプロセスである。とりわけ特徴的な点として、学習時間の増加に対して熟達度の変化が小さい停滞期の存在や、学習時間の増加に対して急速に熟達度が向上する向上期が存在することが挙げられる (図3)。熟達モデルの構成においては、それぞれの停滞期と向上期における動作の特性とそれらの標準的な期間を明らかにすることが必要である。さらに、後に述べる指導者の教示支援を行なうために、各停滞期から向上期へと移行する直前の動作変化の兆候を見出すことも求められる。熟達モデルを構成するためには、一定数以上の試験学習者の動作データを短期間に収集しなければならない。また、試験学習者の動作は自然な学習環境で取得されるべきであることから、通常の学習環境とは異なる特定の環境での学習を強いるものは好ましくない。また、動作データの取得に用いられる機器は、動作学習をできるだけ制約しないものとする必要がある。ただし、熟達モデル構成サブシステムにおいては、個々の学習者の動作データを実時間的に収集、解析する必要はない。一定期間の学習者の動作データを蓄積し、蓄積された複数の学習者の動作データを解析することによって熟達モデルを構成する。

一方、評価教示サブシステムは、学習者の動作デー

タを熟達モデルに基づいて評価し、学習者に必要な教示を行なう、あるいは、指導者に教示内容と教示タイミングを指示する(あるいは直接学習者に教示する)(図4)。評価教示サブシステムは、

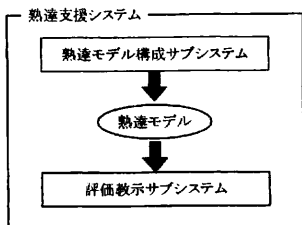


図1: 熟達支援システム

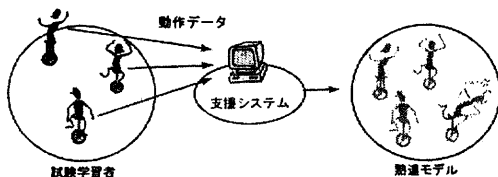


図2: 熟達モデル構成サブシステム

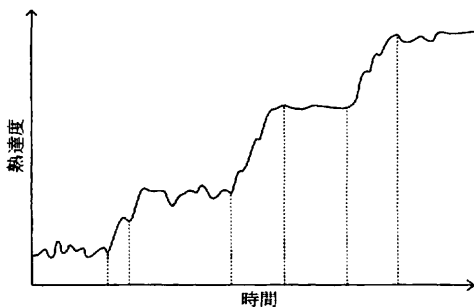


図3: 一般的な熟達モデル

停滞期から向上期への移行の兆候となる動作は停滞期中に複数回観測されることがあることから、このような動作が現れるタイミングで適切な教示を行なうことにより、向上期への移行を早めることも可能となる。これを実現するために、指導者は学習者の熟達レベルとその変化を常に把握し、評価しなければならない [1]。しかし、一般的な学習環境では、学習者の数に対して指導者の数が少ないため、指導者が学習者を常時観測し、熟達レベルを評価することはできない。そこで、本論文で提案する評価教示サブシステムでは、学習者の動作を学習者に装着したセンサにより獲得し、この観測データに基づいて

指導者に教示内容と教示タイミングを指示する(あるいは直接学習者に教示する)(図4)。評価教示サブシステムは、

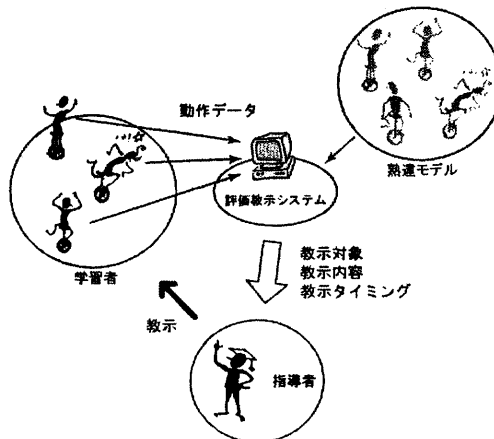


図4: 評価教示サブシステム

システムは、多数の学習者が同期的に学習を行ない、かつ指導者の数が学習者の数と比較して非常に少ない学校教育における体育の授業のような環境において、すべての学習者に対して指導者が適切なタイミングで適切な内容の教示を行なうことを実現するために要求される条件を満たす必要がある。

動作の熟達を対象とするため、学習者の状態は学習者の動作データに基づいて評価することが適切である。したがって、学習者の動作データを集約する手法と動作データをに基づいて熟達度を評価し、評価された状態から適切な教示内容と教示タイミングを求める手法が必要である。これをすべての学習者それぞれに対して適用することにより、適切な支援を実現する。先に述べたように動作の熟達を対象とした学習では、熟達に時間を要し、学習者には継続的かつ反復的な学習を続けることが求められる。このことから、学校教育における体育の授業においてはその学習を体育館や校庭で行なうように、通常的环境における学習を支援することが求められる。しかし、通常学習を行なうすべての環境に対して、動作データ獲得のための装置を設置することは、コストの面からも困難である。また、装置を設置された特別な環境においての学習は、動作の熟達を対象とした学習の特徴から、継続的かつ反復的な学習を行なうには適切ではない。したがって、設置と利用に高度な技術を必要とせず、通常学習環境において容易に利用できる手法が必要である。また、多数の学習者が学習を行なうことから、単一の学習者が機会を与えられて動作を行なうような環境ではなく、同時に学習を行なうすべての学習者の動作データを獲得する必要があり、獲得された動作データに基づいて学習者の状態を評価し、教示の支援を行なうためには、獲得する動作データは継続的かつ実時間的に集約されることが求められる。

以上の考察に基づいて求められた表1の要求条件を満たす熟達支援システムを実現するために、学習者の動

作データの獲得には環境ではなく、小型軽量化された装置を直接学習者に装着して測定を行なうモーションキャプチャ手法を使用する。センサによって測定された動作データは、熟達モデル構成サブシステムにおいてはセンサノード内のメモリに蓄積され、間欠的な無線通信あるいは有線通信によってサーバコンピュータに転送され、熟達モデルの構成に用いられる。一方、評価教示サブシステムにおいては、実時間的に無線通信によって動作データがサーバコンピュータに転送され、学習者の熟達度が評価され、必要に応じて指導者に教示支援がなされる(図5)。本システムは以下のモジュールから構成される(図6)。

- 学習者の動作を妨げない小型軽量化された無線センサノード
- 無線センサノードの取得した動作データをサーバコンピュータの動作データベースへ実時間転送するための無線通信機構
- 試験学習者の動作データから熟達モデルを構成する熟達モデル構成モジュール
- 評価された熟達度と教示データベースから教示対象、教示内容、教示タイミングを導出し、指導者へと通知する教示支援モジュール

次節以降では、一輪車乗車学習を対象として、これらのモジュールのうち、無線センサノードと無線通信機構を設計、試作する。

表 1: 各サブシステムの要求条件と実現デバイス

	熟達モデル構成サブシステム	評価教示サブシステム
測定対象	試験学習者の動作	学習者の動作
測定対象数	複数同時並行	複数同時並行
測定環境	通常学習環境	通常学習環境
データ収集	蓄積	実時間
動作データ取得デバイス	加速度センサ装着	加速度センサ装着
データ収集デバイス	メモリ蓄積+ 間欠的無線通信	無線通信

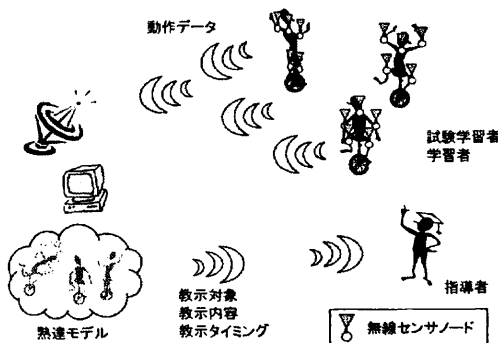


図 5: 無線センサノードを利用した熟達支援システム

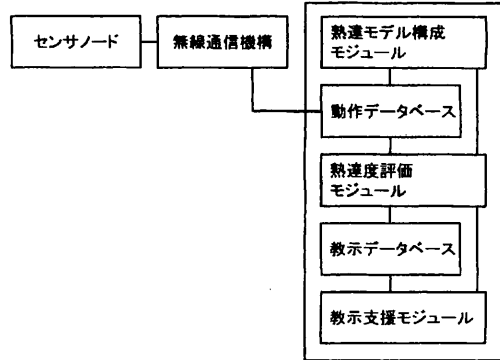


図 6: 無線センサノードを利用した熟達支援システム

### 3.2 無線センサノード

前節で提案した動作熟達支援システムにおいて必要となる学習者の動作データの獲得、集約を行なう、無線センサノードの設計と試作を行なった。この無線センサノードでは、学習者の動作熟達を評価するために、学習者の動作加速度を3軸加速度センサによって測定することにより獲得し、センサデータを無線通信によってサーバコンピュータへと配送する。また、実時間データ配送を行なわない試験学習者の動作データを無線通信設備がない環境においても獲得できるようにするため、無線センサノードにはメモリを搭載する。無線センサノードは、加速度の測定を行なうモジュールと無線通信を行なうモジュールから構成される(図7)。

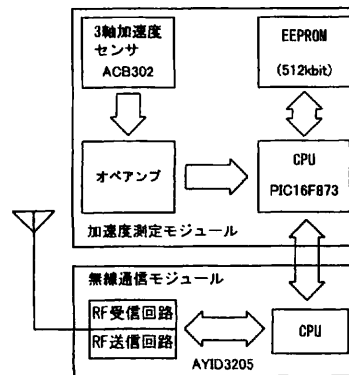


図 7: 無線センサノードのブロック構成図

#### [加速度測定モジュール]

加速度測定モジュールでは、スター精密社製3軸加速度センサ ACB302 [4] から3軸の加速度を電圧として得る。この加速度データを増幅し、各軸ごとに10bitの分解能で秒間640回のA/D変換を行なう。数値に変換された加速度データは、対象の動作データとして必要なデータ量に削減する。この削減は同時に、搭載メモリに

表 2: 無線センサノードの仕様

計測軸	3軸
計測範囲	±2[G]
分解能	10[bit]
測定回数	20[回/s]
連続測定時間	30[min]
周波数	303.2[MHz]
送信出力	3[m]において500[μV/m]以下
変調方式	ASK 変調
通信帯域幅	4800[bps]
符号化方式	マンチェスター符号

必要な測定時間の動作データを格納すること、実時間で動作データを無線通信によってサーバコンピュータに転送することを可能にする。この処理は、PIC16F873において行なわれる。試作した無線センサノードでは、連続する32回の測定データの平均値を出力データとしていることから、

$$10[\text{bit}/\text{軸}] \times 3[\text{軸}] \times 640[\text{秒}]/32 = 600[\text{bit}/\text{秒}]$$

の動作データが生成される。

生成された動作データは搭載されたメモリに記録することができる。熟達モデルの構成のために試験学習者の動作データを収集する場合には、実時間的に動作データをサーバコンピュータに転送する必要がないため、メモリに記録し、学習時間終了後に有線通信でサーバコンピュータに転送したり、無線通信環境条件や動作データ生成状況に基づいて間欠的な無線通信によってサーバコンピュータに転送することができる。試作無線センサノードには、512kbitのEEPROMを搭載しており、600bit/秒の生成動作データを約15分記録する。動作データの記録と無線転送はボタンスイッチで切替可能としている。評価指示のために取得された学習者の動作データは、加速度測定モジュールのCPUから無線通信モジュールへと転送される。

#### [無線通信モジュール]

無線通信モジュールでは、加速度測定モジュールからの加速度データをデータ部として持つフレームを構成し、符号化と微弱無線による送信を行なう。本論文の試作無線センサノードでは、マンチェスター符号化を使用することにより、無線通信の同期を同時に行なう。無線モジュールには、S-NODE AYID3205 [5]を用いる。データのエンコード、デコード、誤り検出はすべてソフトウェアによって実現されている。1回の測定データである各10bitの3軸の加速度データは、図8に示すフレームとして送信される。フレームは72bitから成り、24bitの同期のためのプリアンプルに続いて、32bitのデータ部があり、ここに加速度データが格納される。このデータ部に8bitの終了コードが続き、最後にチェックサムデータが8bit格納される。送信データは303.2MHzのASK変調による微弱無線で送信される。微弱無線は無線局の免許申請が不要であり、制限された出力の範囲内での利用が自由であることから、学習環境に対する制約とならない。サーバコンピュータでは、受信するフレームごとにACKフレームを返信し、無線センサノードがACK

フレームを受信するまで50ミリ秒～500ミリ秒間隔で再送信を行なう。試作した無線センサノードを図9に示す。現在のサイズは72mm×47mm、重さ60gであり、ボタン電池によって動作する。

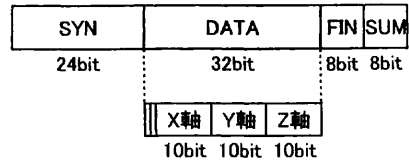


図 8: 無線通信フレーム構成

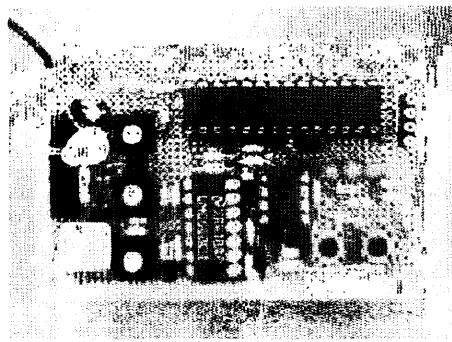


図 9: 無線センサノード

## 4 測定実験

前章で述べた試作無線センサノードを用いて、一輪車乗車学習支援を目的とした使用実験を行なった。ここでは、無線センサノードを一輪車のサドル下部に取り付け、一輪車のサドル部の動きを学習者の動作として測定した(図10)。これは、現在の試作センサノードが学習者の重心の動きをよく表しており、熟達度の判定に重要なデータであると考えられるためである。また、無線通信モジュールの動作確認と性能評価のために、測定データは実時間的に無線通信を用いてサーバコンピュータに転送する。

被験者2名が8週間に渡って学習実験を行なった。被験者は毎日約15分間の学習を行ない、その後測定実験を行なう。この測定実験時にはビデオ撮影を同時に行ない、熟達過程の評価に取得した動作データが十分なものであるかを判断するために活用した。図11に測定実験の様子を、図12に初期、中期、末期において測定された加速度データを示す。無線通信については、無線センサノードからサーバコンピュータまでの距離が50m程度までについては、十分実時間的に動作データを転送することが可能であることから、学習者が通常の学習環境で動作の制約なく学習している状況を観測することが可能であるといえる。また、熟達モデルの構成については、集積された動作データから乗車継続時間、各軸の安定性とその変化を得るための手法を現在検討している。

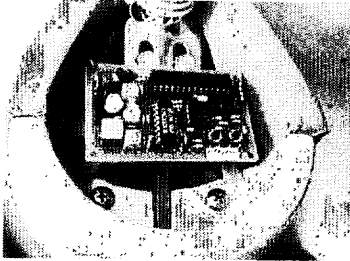


図 10: 一輪車に取り付けたセンサノード



図 11: センサノードによる動作データ収集

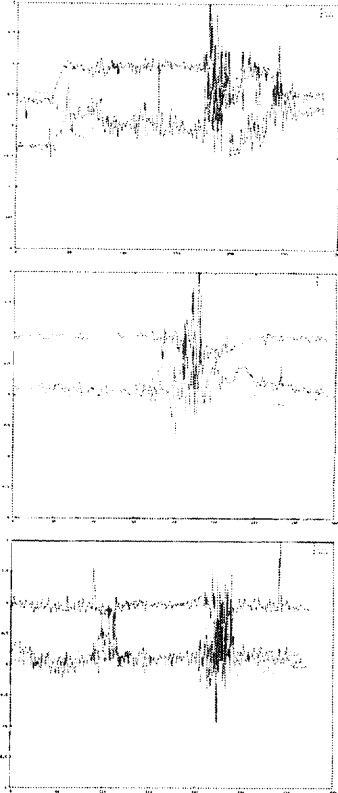


図 12: 加速度データ

## 5 まとめと今後の課題

学校における体育の授業のような、指導者に対して学習者が多数存在する条件下における動作の熟達に対する教示を支援するため、無線センサネットワークを利用した学習者の動作情報を入力として教示対象、教示内容、教示タイミングを指導者に与える u-learning 学習支援システムを提案した。また、この u-learning 学習支援システムにおいて必要となるサブシステムである学習者の動作を妨げない小型軽量化されたセンサノードとセンサノードの取得データを支援システム（サーバコンピュータ）へ実時間配送するための無線通信機能を実現するため、3軸加速度センサのデータを無線通信によってサーバコンピュータへと配送する無線センサノードを設計、試作した。

試作した無線センサノードは、熟達モデル構成、評価教示のいずれにも使用できるものとしたが、それぞれが求める機能を十分には満足していないと考えられる。熟達モデル構成の段階では、動作データの実時間転送を必要としないが、小さな動作変化が熟達度の変化やその兆候を表している場合が考えられるため、全学習時間内により詳細な動作データを獲得できるようにすべきである。一方、評価教示の段階では、多数の学習者の動作

データを実時間的に配送することが求められるため、転送データの圧縮や不要と考えられるデータの削減を行なう必要がある。後者の実現にあたっては、学習モデルの一部をセンサノードに組み入れることも考えられる。また、無線通信プロトコルは、多重アクセスをサポートする必要があり、無線 LAN プロトコルの導入も含めて再検討を行なう。

## 参考文献

- [1] Brown, J.S., Collins, A. and Duguid, P. "Situated Cognition and the Culture of Learning" Educational Researcher, Jan-Feb, pp. 32-42 (1989).
- [2] Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Proceedings Communications of the ACM, Vol. 47, No. 6, pp. 30-40 (2004)
- [3] Fischer, G., "User Modeling in Human-Computer Interaction" The 10th Anniversary Issue of the Journal of User Modeling and User-Adapted Interaction (UMUAI), Vol. 11, pp. 65-86 (2001).
- [4] <http://www.star-micronics.co.jp/products/sensor/se05.htm>.
- [5] <http://www.ymatic.co.jp/>.
- [6] <http://www.istsec.fi/>.
- [7] <http://www.apple.com/pr/library/2006/may/23nike.html>.