

ハイビジョン時代の講義アーカイブに向けた取り組み —教室での講義コンテンツ化—

亀田 能成[†]

[†]筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†] kameda@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし e-learning 新時代と言われ、講義のコンテンツ化が求められるようになった現在でも、教室での板書を中心とする講義は根強く支持されている。本稿では、教室で通常行われている板書講義を対象に、正しい設計指針に基づくハイビジョン品質の映像獲得とそのストリーミング技術によれば、一般的な板書講義を受講生の要求水準に合う形でコンテンツ化ができることを示す。技術検討の結果から、現在比較的容易に入手可能な設備で、ハイビジョンによる講義アーカイブを十分な品質で構築することが可能である。実際に、ハイビジョン品質の講義アーカイブシステムのプロトタイプを作成するとともに、受講生への聞き取りによる調査から、ハイビジョン品質の講義アーカイブが講義を受講する上で十分な品質となることを確認した。

キーワード フルハイビジョン, HDTV, ストリーミング, CODEC, 黒板, 白板, 板書

A Study for Lecture Archive in HD Video Age —Making Lecture Content in Classroom—

Yoshinari KAMEDA[†]

[†] Department of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

E-mail: [†] kameda@iit.tsukuba.ac.jp

Abstract This paper proposes the effective design of a lecture archive system that manages the recordings of the lectures in HDTV quality. It is important for lecture archive to be able to cover ordinary lecture style in which teachers write and draw something on a blackboard and/or whiteboard on giving lectures. We first discuss the demands of audio/video quality for lecture archive based on the visual and auditory ability of participants in classes. Then we reveal that HDTV recordings can sufficiently preserve the all the teaching materials that are given from teachers in a class. We have implemented a preliminary archive system that follows the proposed design. We also have conducted some experiments in which students remarked that watching the lectures through this system is almost equally valuable as actually joining the class.

Keyword Full HD, HDTV, Streaming, CODEC, Blackboard, Whiteboard, Hand writing

1. はじめに

教室で行われる対面講義は、教育における一級のコンテンツであるため、その講義内容を収録できれば、それはすなわち講義コンテンツ化への大きな一歩となる。講義のコンテンツ化の推進は、講義室まではアクセスできない利用者に、講義内容へのアクセス手段を提供することにつながる。そのため、講義アーカイブはこれまでも盛んに研究されてきた。

教室での対面講義をアーカイブして講義コンテンツ化する目的は、大きく分けて2つ考えられる。一つは、講義参加者が講義室内で講義中に得られるその場限りの情報を記録に残すこと、もう一つはその記録に

アクセスできるようにし再利用することである。

本稿では、講義参加者が講義室内で講義中に得られるその場限りの情報のことを講義情報と呼ぶ。講義情報には講師の話声はもちろん、板書や講師の身ぶり等、授業に参加していない者には与えられない性質のものをすべて含む。

板書やスクリーン提示を含む対面講義のアーカイブへの取り組みとしては、講師と黒板等に注目した研究が挙げられる[1-7]。これらはいずれも低い解像度の映像を用いて効率的に講義内容をとらえようという研究方針と考えることができる。一方、映像合成によって高精細映像を合成し講義全体の状況を伝えようとい

う逆の枠組みの研究も行われ[8-10]、さらにはそれに基づく技術応用も報告されている[11]。この高精細映像合成方式は再生側に負荷がかかるという難点があったが、近年の技術革新により、実際のシステムが構築されつつある[12-13]。

従来の遠隔講義・講義アーカイブでは、教育効果への評価[13]は行われているものの、講義を対象として明確に限定した上で記録すべき情報の品質の水準を明示しようという研究がなされておらず、そのためにアーカイブとしての記録品質の基準が定まらない状態にあった。

本稿では、最近の技術革新によって運用可能になった記録・再生技術水準が、講義内容の記録およびその再生に要求される基準に到達しつつあることを示し、それに基づく講義アーカイブシステム設計の指針を示す。

講義アーカイブシステムに望まれる要件は多岐に渡るが、以下に重要な点を挙げる。

1. 【記録品質】アーカイブとして成立するために、講義中に講師からもたらされる講義情報を全て記録すること。
2. 【事前準備】講師の手間を減らすために、収録前の準備に必要な手間を最小化すること。これは間接的に講義アーカイブに賛同して頂ける講師を増やすことに貢献する。
3. 【講義スタイル】従来通りの講義スタイルに対応できること。これも2.同様に講義アーカイブに賛同して頂ける講師を増やすことに貢献する。
4. 【システム構成】大学等教育機関で行われる講義は相当数に上るため、収録・保存・再生に必要なシステム構成は簡易かつ低コストであることが望ましい。
5. 【再生手段】幅広い受講者が参加できるように再生に必要なソフトウェアは可能な限りすでに普及済みのものであることが望ましい。
6. 【知的所有権】アーカイブに関連する知的所有権の管理が柔軟に行えること

本稿では技術面のみを議論するため、上記の1-5を取り上げ、知的所有権に対する議論は他稿に譲るものとする。

2. 講義収録における要求水準

本節では記録品質と講義スタイルについて考える。講義室における講義では、当然のことながら受講者がそこでその講義内容を受け取ることが前提となっている。換言すれば、受講者の視聴覚能力以上に情報提示をしても講義としては成立しない。このことから、受

講者が受講にあたって用いる視聴覚能力を考察することは、講義収録にあたっての要求水準を定義する上で重要である。

2.1. 音声

講師の音声は、講義において最も重要な収録対象である。講義に際しては、次の2項目を重視する。

- 講師が話す言葉
- 講師の話ぶりに合わせた音声情報

講師が話す言葉だけではなく、講師の話ぶりを表す音声情報もまた、講義の臨場感を伝える上では重要な役目を果たしている。このために、音声収録にあたっては、可聴域全体に渡って一定レベル以上の音量を確保し、高いS/N比を得ることが望まれる。

なお、肉声では末端まで声が届かないような教室では拡声装置が用いられることが多いので、そのような状況に容易に対応できる収録方法を準備する必要がある。

一方、質問や議論で出てくる受講者の声も講義においては重要な役割を占めるが、受講者の肖像や音声を収録する場合、個別に承諾が必要となる可能性がある。この問題を避けるためには、受講者側の音声を直接収録せず、必要に応じて講師が質問内容を復唱することで収録することが望ましいと考えられる。

2.2. 視覚的に与えられる教材

受講者が受講時に目で見える視覚情報は、大きくは3種類に分類できる。一つは教科書やプリント等各受講者の手元の配布資料であり、もう一つは講師が黒板やスクリーンなどで表示する提示素材、三つ目は講師自身の身ぶりである。このうち、提示素材と講師の身ぶりの二つは、講義中でなければ受講者が受け取れない情報であるので、本稿の講義アーカイブでは、この二つについて考察を進める。なお、本稿では空間分解能について議論する。

2.2.1. 提示素材

講師が持ち込んだりその場で視覚的に提示したりする素材は、多くの講義室では教室前面に展開される。その展開場所としては以下の3種類が代表的であり、以下これらを総称して「素材提示面」と呼ぶ。

- 黒板
- ホワイトボード
- プロジェクタスクリーン

素材提示面の空間的視覚要因としては2つ考えられる。一つは、素材提示面上の分解能であり、もう一つは受講者の視力である。

素材提示面の分解能については、黒板についてはチョークの線幅の1mm~2mm程度、ホワイトボードについてはホワイトボードマーカの中字線幅の2mm程度

が目安となる。プロジェクタスクリーンの分解能については、スクリーンの物理的大きさと映像信号の分解能で決定されるが、1画素あたり1.5mm以上確保されていることが多いようである¹。

一方、受講者の視力について、視力1.0を想定すると、これはその定義から5m先の直径7.5mmのランドルト環の方向が識別できることを意味する² (図1)。この環のギャップは1.5mmなので、視力1.0の受講生が素材提示面から5m程度の位置に座していると仮定すると、素材提示面の分解能は1.5mmを下回ってはならないことになる。

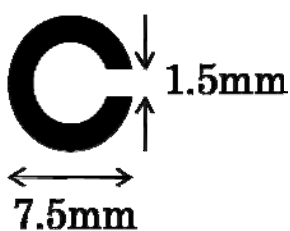


図1 視力1.0のランドルト環(5m距離)

2.3. 講師身ぶり

講師の身ぶりは、講義スタイルに関係し、講義の様子を伝える上では音声と並んで重要な要素である。本稿では、通常の講義室で素材提示面の前に講師が立ち、そこでポインティングなどの動作を行うという講義スタイルを想定する。このことから、講師は概ね素材提示面の前に立っていることになる。

提示素材と異なり、講師の身ぶりが数mmオーダの精度で重要になることは少ない。故に、講師の身ぶりについては、素材提示面に要求される空間分解能以上の映像解像度は必要ないと考えられる。

講師身ぶりについて考慮すべきもう一つの要因が時間分解能である。一般的な受講者の視覚を考えればビデオレートが望ましいが、これについては実験で示すようにより低いフレームレートでも講義受講としては許容できるとの評価が得られている。

3. 講義収録方法

前節で述べた要求水準を満たしうる講義収録のための現実的手段がハイビジョン(HD)撮影である。ここで想定するハイビジョン収録条件を表1に示す³。このHD撮影に対して2.2節で想定した空間分解能1.5mm

を当てはめると、表2に示すような素材提示面の大きさが得られる。

表1 ハイビジョン収録条件

項目名	規格
解像度	1920×1080画素
フレームレート	29.97fps
音声サンプリングレート	48kHz
音声チャンネル数	2

表2 HD撮影に対応する素材提示面の大きさ

分解能[mm]	HD横長[mm]	HD縦長[mm]
1.0	1,920	1,080
1.5	2,880	1,620
2.0	3,840	2,160

ハイビジョン画像中に素材提示面の占める割合を、画像使用率と呼ぶ。素材提示面のアスペクト比とハイビジョン画像の縦横比16:9とが一致していれば、撮影領域の全てを素材提示面に合わせることができ、画像使用率E=1.0となる。一般に素材提示面のアスペクト比がH:Vであり、素材提示面をすべてハイビジョン画像中に含むように撮影すると、画像使用率Eは次式で表わされる。

$$E = \begin{cases} \frac{16V}{9H} & \text{if } \frac{H}{V} \geq \frac{16}{9} \\ \frac{9H}{16V} & \text{otherwise} \end{cases}$$

なお、同じ素材提示面に対し、画像利用率が100%になるように、素材提示面の周縁部を切り取ることを考えると、素材提示面中におけるハイビジョン撮影領域の比率(面使用率と呼ぶ)Fは、H、Vの値に関わらず常にF=Eの関係が成立する。

今、素材提示面である黒板が横360cm縦120cmの場合、画像使用率(full-cover ratio)は59.3%となり、面使用率(cut-out ratio)も同じく59.3%となる(図2)。

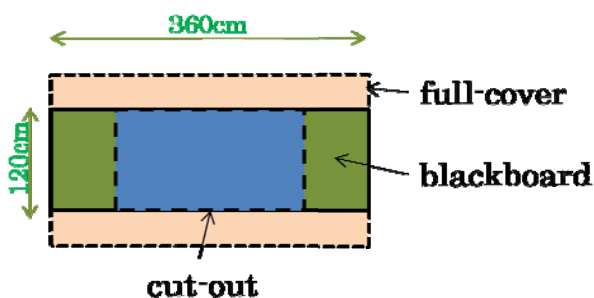


図2 画像使用率と面使用率

ハイビジョンカメラで素材提示面を撮影する場合、カメラから素材提示面への距離はレンズに依存するが、概ね数メートルは確保できることが多く、カメラと素材提示面との間に講師が立つことができる。この状況

¹ 例えば1280×1024のプロジェクタを幅2m程度のスクリーンで提示すると1.56mm/画素となる。

² ISOの定義より3%ほど小さいが日本国内ではこの定義のほうが一般的とみられるので、本稿でもこれを採用する。

³ SANYO社製DMX-HD2000のFullSHQ撮影モードは本条件を満たす。

であれば講師は通常の対面講義での講義スタイルを採ることができ、講義収録を行うことを意識せずに収録に望むことができる⁴。

なお、このとき、教室によってはカメラが受講席エリアの中に位置することがある。この場合、カメラ内蔵のマイクに対して、講師音声よりも周辺の受講生の音声のほうが音圧が高くなる可能性がある。2.1 節でも述べたように、受講生の音声は場合によっては収録に不向きであることがあるので、この場合はワイヤレスマイクロフォン⁵を講師の近くに設置することが望ましい。

4. 映像圧縮

ハイビジョン映像は解像度が高いため、高精細な映像を得ることができるが、その一方でデータサイズが問題となる。特に、収録データ保存時に高帯域が必要になると、再生時にネットワークへの負担が高くなるのが懸念される。

ここでは、一般に講義では、動きの激しい提示素材が用いられることがあまりないため、通常のハイビジョン映像よりも圧縮率を高めても講義視聴に影響はでにくいことに注目する。

なお、音声に関しては、講義では重要であることと、映像に比べて単位時間当たりのデータ量が要求されないことから、高い圧縮は行わないものとする。

本稿では、講義映像圧縮に Perfect Grade(PG)⁶、Master Grade(MG)、Standard Grade(SG)の3モードを提案する。それぞれの規格を表3に示す。また、参考までに、2008年11月に正式サービスが開始された YouTube の HD 版の規格も併せて示す⁷。

表3 講義映像圧縮規格

モード	PG	MG	SG	Youtube HD
横[pixel]	1920	1920	1920	1280
縦[pixel]	1080	1080	1080	720
fps	29.97	29.97	1.00	29.97
bps/video ⁸	12.0m	2.0m	400k	2.0m
bps/audio	128k	128k	128k	128k
CODEC/v	H264	WMV8	WMV8	H264
CODEC/a	AAC	WMA-v2	WMA-v2	AAC
10分	911MB	159MB	29.3MB	159MB
90分	8.2GB	1.4GB	263MB	1.4GB
90分13回	106.6GB	18.6GB	3.4GB	18.6GB

⁴ 素材提示面で2mm分解能を想定し、DMX-HD2000を最広角(35mmフィルムで焦点距離44.4mm相当)にすると4.87m以上の距離がカメラから素材提示面までに必要である。

⁵ SANYO社製HM-W300など。

⁶ DMX-HD2000のFullSHQと同一規格。

⁷ 2009年4月現在。

⁸ 可変bitrate圧縮を行うため値は概数。

PGは講義収録時に用いる規格で、高帯域と引き換えに高精細な映像を保存することができる。一方、MGは講義アーカイブとして必要十分な映像品質を確保できる規格であり、若干圧縮ノイズが見受けられるものの、提示素材を限界の解像度で見たり、講師の身ぶりを視聴するには十分な品質となっている。SGは低帯域ネットワーク利用を前提とする講義アーカイブに特化した規格であり、主に時間解像度を犠牲にしているが、板書やホワイトボードを利用した講義などにおける講義情報の視聴には問題ない品質である。MGとSGは、PGから再圧縮することで得るが、MGの必要帯域はPGに対して1/6~1/5程度、SGの帯域はMGからさらに1/6~1/5程度ということから、データ量の増加は限定的である。日本の一般的な大学での講義は90分授業が13週程度であることを考えると、MGであればBlue-Ray DVD1枚に全講義が保存可能であり、SGならばDVD1枚でも保存できることが表3からわかる。

5. アーカイブシステムと映像再生

前節で導入したPG、MG、SGの規格は、講義情報の視聴に必要な品質が確保できるように定めてあるが、前述のような規格決定となったもう1つの理由が再生手段に対する配慮である。

通常講義アーカイブシステムの同時アクセス数はそれほど多くない⁹ことと、サーバとしての運用継続性を考慮し、講義アーカイブシステムではストリーミングサーバ機能を用意するよりも、通常のWWWサーバの通常のファイル配信機能¹⁰だけを利用し、ストリーミング機能については利用者側のプレーヤに任せるものとする。

利用者のソフトウェア導入負荷を考えると、想定するプレーヤは最近のPC環境で標準的に装備されているプレーヤであることが望ましい。表4は各モードの対応を示したもので、embedはウェブブラウザ内で視聴可能であることを意味し、directはプレーヤ単体での視聴を意味する。Streamingは、embed、やdirectにおいても利用者サイドでのストリーミング¹¹ができることを示す。

⁹ 一般公開しなければ上限は受講者数であり、経験上さらに同時視聴数は少ない。

¹⁰ 各講義ビデオクリップの長さを10分未満程度にしておくことで最大ファイルサイズが1GB未満となり可用性が高まる。

¹¹ 「URLを開く」等の操作により、ファイル全体のダウンロードが完了する前から再生を開始できる機能のことを指す。

表 4 再生プレーヤ

モード	player	embed	direct	streaming
PG	Adobe™ Flash Player 10	○	×	○
MG	Windows™ Media Player 11	○ ¹²	○	○ ¹³
SG	Windows™ Media Player 11	○ ¹⁰	○	○ ¹¹

現行のPC環境において、もう1点プレーヤに望まれるのは、ディスプレイ以上の解像度の映像ストリームを100%の拡大率で再生できることである。最近のPC環境にあっても、1920×1080以上の画素数のモニタの普及率はまだ高くないため、この配慮は十分な解像度で映像を視聴するためには必須である。Embed方式で再生した場合はこれを行うことができる。

6. 実験と評価

本稿で述べたシステム設計指針に基づいて構築した実験システムの様子を図3に示す。

		02/10, SANY0140.MP4 [2009/04/07, 16:51:30]					
講義撮影に必要な解像度について ~3.6m幅の黒板を例にして(1.875mm/pix)~							
mode	subcode	URL	length	size	width	height	fps
PG		direct / embed	8:55.10	812,941,312	1920	1080	29.970
MG	02-01	direct / embed	8:54.50	143,086,590	1920	1080	29.970
SG	02-01	direct / embed	8:56.00	26,165,264	1920	1080	1.000
		03/10, SANY0141.MP4 [2009/04/07, 17:00:40]					
講義撮影に必要な解像度について ~1.2mの高さの黒板を例にして(1.111mm/pix)~							
mode	subcode	URL	length	size	width	height	fps
PG		direct / embed	7:25.31	676,659,200	1920	1080	29.970
MG	03-01	direct / embed	7:24.78	119,024,734	1920	1080	29.970
SG	03-01	direct / embed	7:26.00	21,778,862	1920	1080	1.000
		04/10, SANY0142.MP4 [2009/04/07, 17:08:52]					
講義撮影に必要な解像度について ~XGAプロジェクタ(1280x1024)~							
mode	subcode	URL	length	size	width	height	fps
PG		direct / embed	9:09.22	834,535,424	1920	1080	29.970
MG	04-01	direct / embed	9:08.58	146,782,924	1920	1080	29.970
SG	04-01	direct / embed	9:10.00	26,749,936	1920	1080	1.000

図 3 講義アーカイブシステム

同一ページを下記URLにて公開中である。PGモードは本学学外からのアクセスは本学の事情により帯域不足となる恐れがあるので注意されたい。

http://www.kameda-lab.org/lecture/archive/2009/200904/20090407_tutorial2/index-j.html

本講義アーカイブシステム構築に先立ち、時間分解能についての評価実験を行った。2008年5月と6月に、

¹² WindowsXP, IE7以降。

¹³ WindowsVISTA以降。

本学工学システム学類3年生配当の講義(一回あたり75分×2コマ)を事前撮影の上、ビデオ講義を実施し、受講生からアンケートを取った。実験条件を表5に示す。講義スタイルはいずれも板書による対面講義である。講義アーカイブのスナップショットを図4に示す。

視聴後に下記の質問Q1, Q2を実施した。有効回答数を表5に、回答集計結果を図5及び図6に示す。なお、被験者はいずれも本講義アーカイブを本実験で初めて体験した。講義内容にも依るが、本講義のように板書主体の場合、講師の身ぶりを確認する必要性を受講生は感じておらず、その結果がQ1の回答傾向(図5)に反映されていると思われる。また、Q2の回答(図6)に示すように、講義アーカイブに対する受講生の評価は対面講義への評価と同等レベルである。これは、一つには実験を実施した講義の通常の教室が縦長であり、受講者は前面の黒板から3m~15mに着座しているため、普段教室後方にいる学生にとっては講義アーカイブ映像のほうが鮮明に板書内容を確認することができたためではないかと考えられる。

表 5 講義ビデオ評価実験

	実験 1	実験 2
実験実施日	2008/5/9	2008/6/3
素材提示面	ホワイトボード	ホワイトボード
映像本数	6	6
総時間	2:09:16	2:28:23
解像度	1712×576	1744×592
fps	1.00	1.00
bitrate ¹⁴	460Kbps	320Kbps
Q1 回答数	23	12
Q2 回答数	23	12

[Q1] 講師の動きの滑らかさをどう感じましたか？

- A: 今回のフレームレートで十分
- B: よりフレームレートが高いほうが良いが30fps(通常の映像)は不要
- C: 30fps(通常の映像)は必要
- D: 今回のフレームレートよりも遅くてもよい

[Q2] 講義室の板書授業と比較してどちらが好みですか？

- A: 今回のデジタルビデオ
- B: どちらかと言えば今回のデジタルビデオ
- C: どちらともいえない
- D: どちらかと言えば講義室の黒板での板書
- E: 講義室の黒板での板書

¹⁴ 6本のビデオそれぞれにbitrateが異なるため、ここでは6本の平均値を示す。

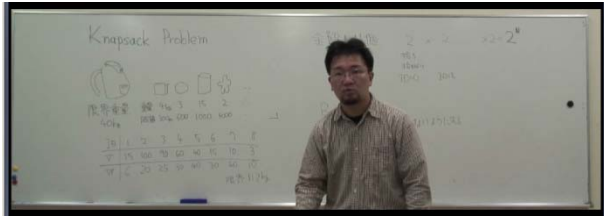


図 4 講義アーカイブのスナップショット

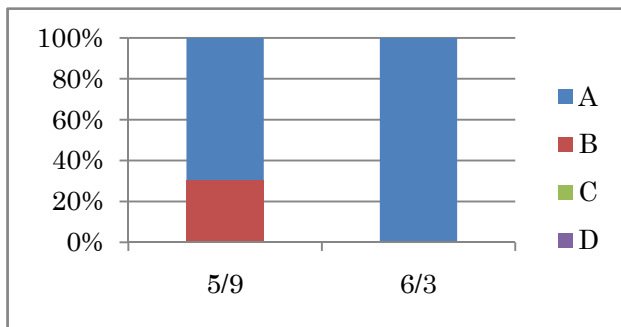


図 5 講師の動きの滑らかさへの評価

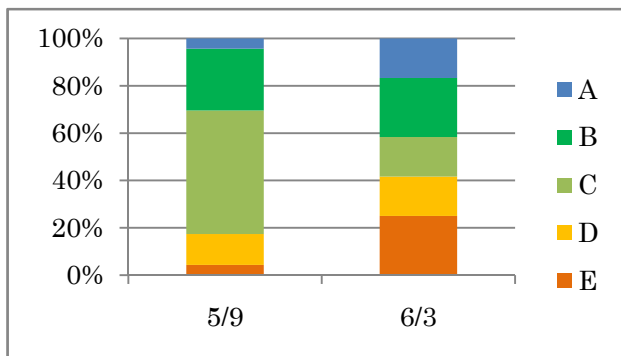


図 6 対面講義と講義アーカイブとの比較

7. おわりに

本稿では、ハイビジョン品質の映像収録とそれに基づく映像配信の技術水準が、講義利用の観点から講義アーカイブとしてもはや十分なレベルに到達していることを示し、実際のシステム構築のための設計方針を示した。実際に必要な機材は比較的低廉なもので十分であり、システム構築に必要なソフトウェアも今日では全て無償で入手できることを考えると、今後このような形式の講義アーカイブシステムは増加することが予想される。

映像素材としてハイビジョン映像は優れている。一方で、収録済み講義の検索については、日時情報を除けば別途人手により付加されたアノテーション情報に頼ることになる。これについては今後の研究課題である。

文 献

- [1] Yoshinari Kameda, Hideaki Miyazaki, and Michihiko Minoh: "A Live Video Imaging for Multiple Users", Proceedings of International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'99), vol.2, pp.897-902 (1999)
- [2] 綿織 修一郎, 菅沼 明, 谷口 倫一郎: "黒板講義を対象とした遠隔講義のための講義自動撮影システムの構築", 電子情報通信学会 技術研究報告 ET, vol.100 no. 352, pp.63-70 (2000)
- [3] 大西 正輝, 村上 昌史, 福永 邦雄: "状況理解と映像評価に基づく講義の知的自動撮影", 電子情報通信学会論文誌, vol.J85-D-II, no.4, pp.594-603 (2002)
- [4] Yoshinari Kameda, Satoshi Nishiguchi, and Michihiko Minoh: "Carmul: Concurrent Automatic Recording for Multimedia Lecture", Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME2003), vol.1, pp.129-132 (2003)
- [5] 大西 正輝, 村上 昌史, 福永 邦雄: "受講者の心理状態を考慮した講義の自動撮影", 電子情報通信学会論文誌, vol.J87-D-II, no.8, pp.1728-1734 (2004)
- [6] 西口 敏司, 村上 正行, 亀田 能成, 角所 考, 美濃 導彦: "受講者撮影機能を持つ双方向コミュニケーション記録型講義自動アーカイブシステム", 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), vol.17, no.5, pp.587-598 (2005)
- [7] 西口 敏司, 亀田 能成, 角所 考, 美濃 導彦: "大学における実運用のための講義自動アーカイブシステムの開発", 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-D-II, no.3, pp.530-540 (2005)
- [8] 大西 正輝, 泉 正夫, 福永 邦雄: "デジタルカメラワークを用いた自動映像生成", MIRU, vol. I, pp. 331- 336 (2000)
- [9] 米川 輝, 立花 綱治, 相田 達也, 若原 裕範, 岩月 正見: "通常教室における講義のデジタルコンテンツ自動作成システムの試作", メディア教育研究, vol.1, no.2, pp.83-90 (2005)
- [10] 八代 武大, 森村 吉貴, 西口 敏司, 角所 考, 美濃 導彦: "講師追跡撮影カメラと平面对象撮影カメラを併用した講義室の高解像度画像合成", 電子情報通信学会論文誌, vol.J92-D, no.2, pp.236-246 (2009)
- [11] 横井 隆雄, 藤吉 弘亘: "高解像度映像からの自動講義ビデオ生成-仮想カメラワークの実現-", 第11回画像センシングシンポジウム, pp.73-76 (2005)
- [12] 高精度遠隔講義システム (京都大学), <http://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/services/distlearn/KHi-system.php>
- [13] 多地点制御遠隔講義システム (東京農工大学他), <http://jets.med.tuat.ac.jp> (2009)
- [14] 村上 正行, 西口 敏司, 亀田 能成, 角所 考, 美濃 導彦: "京都大学での実践に基づく講義アーカイブの調査分析", 日本教育工学会論文誌, vol.28, no.3, pp.253-262 (2004)