

Log-Logにおけるセンシング手法とコンテンツ

高田 英明¹⁾, 金 延炫¹⁾, 飯田 誠²⁾, 苗村 健¹⁾, 太田 裕之³⁾

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

2) 東京大学大学院工学系研究科

3) 株式会社日立製作所機械研究所

Abstract : Log-Log はひずみセンサーを利用した平均台型インターフェースである。ひずみセンシングを利用したインターフェース化において、実際には接着剤によるひずみの減衰や材質の初期ひずみの影響等、インターフェース化する物体の特性、設置環境に応じた工夫が必要となる。また、ねじりひずみの計測について十分な精度を出せず、ねじりひずみ特性を活かしたコンテンツ応用に至っていない。本稿では、センサの貼り付け方や、ひずみ値の処理に関する工夫について述べる。またその結果として得られた感度特性を利用し、Log-Logの平均台についてねじりの実験を行い、ねじり・ひずみの応用可能性を調べた。これらの検討をもとにした、LogLogのコンテンツ改良と展示について紹介する。

Key Words: Log-Log, ひずみ計測, ねじり, 実物体, ユーザインタフェース

Improved method of sensing and advanced contents for Log-Log

Hideaki TAKATA¹⁾, Jung-hyun KIM¹⁾, Makoto IIDA²⁾, Takeshi NAEMURA¹⁾ and Hiroyuki OTA³⁾

1) The University of Tokyo School of Information Science and Technology

2) The University of Tokyo School of Engineering

3) Hitachi, Ltd. Mechanical Engineering Research Laboratory

Abstract : This paper describes improved methods of attachment of strain sensors and analysis procedure. Therefore advanced contents for Log-Log which is strain based user interface using a wooden balance beam are introduced. When Log-Log is used as an interface, there are some problems, for example, a sensitivity erosion caused by an adhesive, an influence of initial strain of the material, and so on. To solve these problems, an advanced Log-Log comes with a twist. This paper shows how to put strain sensor and improve an analysis procedures of strain data. As a result, it makes an advanced Log-Log possible to get more accurate value of strain and torsional displacement. In this paper also, the experimental results on Log-Log to investigate the characteristics of torsion and how to apply it to contents. Finally, we report about exhibitions of Log-Log2008, which is an advanced Log-Log.

Key Words: Log-Log, Strain measurement, Torsion, Real objects, User interface

1. はじめに

筆者らは、人とコンピュータの接点、つまりバーチャルとリアルな接点について、実世界にのみ存在する、重さや変形といった物理量を活用したインタフェースを構築することを目指している。その実現に向かって、我々は物体に荷重がかかったときに生じる微小な変形量である“ひずみ”に

着目した。ひずみの測定は、ひずみセンサなどのデバイスの物体表面への貼付のみでひずみ量を取得可能である。そのため、身の回りにあるような生活用品や、壁や床、ベンチなど既存の物体を容易にインタフェース化することができる。その対象は、人工物のみならず、植物などの自然物にも適用可能で、その簡便さと適用範囲の広さが特徴の一つ

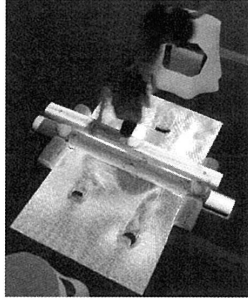


図 1: Log-Log の概観

として挙げられる。このような利点から、我々は“ひずみ”を用いた、“どこでも何でもインタフェース”というコンセプトを持つ作品を幾つか発表してきた [1][2]。しかしこれまで、センサの貼り付けなどの事前の準備が多く必要であり、前述のひずみ計測による利点を十分に活かしていなかった。

本研究では、昨年発表された、木でできた平均台をひずみセンサによってインタフェースとした作品“Log-Log” [2] についての課題とそれを解決する工夫、そして“Log-Log”のコンテンツとその表現について述べる。Log-Log での問題解決やひずみ計測の改善を通して、ひずみ計測を応用した自然物など様々な物体のインタフェース利用への足がかりとする事がねらいである。

2. Log-Log について

2.1 Log-Log の概要

Log-Log とは 2007 年に天野らによって発表された、木の丸太でできた平均台と川の流れの CG からなる作品である (図 1)[2]。この作品は平均台に取り付けられたひずみセンサの出力から、力の位置とひずみの量の関係を解析することにより、平均台上の使用者の重心の位置を推定する。また、平均台に生じるねじり変位を計測することにより、平均台上において使用者が前後に体を傾ける動作を検出することも可能である。これらの重心の位置や、ねじり成分に応じて、平均台の下にプロジェクタによって投影された川が流れる映像の中に影を描写する。川の映像は流体力学に基づくシミュレーションで、ユーザの影はそのシミュレーション内で障害物として取り扱われ、ユーザの動きに応じて川の流れが本物の川のように変化する。このように Log-Log は、平均台の上のユーザの行動や体勢による変化を、平均台の下に投影された自分の影と、自分の動きによって変化する川の流れを見て楽しむ作品である。

2.2 システム

Log-Log に利用した平均台の寸法を図 2 に示す。平均台は長さ 1800[mm]、高さ約 450[mm] であり、架橋部は直径が約 160[mm] の松の丸太で構成されている。また平均台の長辺の左端から 150[mm] と 1650[mm] で、架橋部が脚部に固定されている。

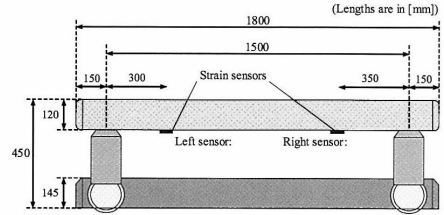


図 2: 平均台の寸法

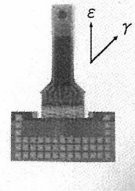


図 3: 半導体ひずみセンサ

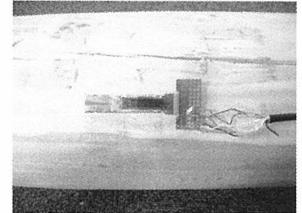


図 4: ひずみセンサの接着

丸太に生じるひずみを取得するセンサとして、日立製作所機械研究所が開発した半導体ひずみセンサ [3] を使用した。センサの概観を図 3 に、丸太に貼り付けた様子を図 4 に示す。センサは、図 3 に示す ϵ 方向と、45 度ずれた γ 方向の二方向のひずみを測定可能である。図 4 のように貼り付けた場合、 ϵ 方向は、たわみによるひずみ (曲げひずみ) を、 γ 方向は、ねじりによるひずみ (せん断ひずみ) を測定できる。ここでは、センサは平均台の左端から 450[mm] と、1300[mm] の位置に、図 4 の ϵ 方向が内側を向くように貼り付けた。これにより、ねじりに関して、センサの内側では二つのセンサが同じ方向に反応する。

2.3 位置推定方法

Log-Log におけるユーザの重心の位置推定方法について説明する。図 5 のように、平均台の固定部間長さを L [mm] として、センサ A 側の端から x [mm] の距離に加重 P [N] が加わり、変形が生じたとする。その時のセンサ A とセンサ B が測定する曲げひずみの値を夫々アンプ回路で増幅し、次にその増幅率が同程度になるように補正する。増幅後補正された A と B のセンサの値を V_a [V]、 V_b [V] とすると、荷重点 x [mm] を

$$x = L \times \frac{V_b}{V_a + V_b} \quad (1)$$

と推定する。このように、Log-Log ではセンサ A の値とセンサ B の値から L の内分点をとって重心の位置としている。

2.4 Log-Log の課題

本章ではひずみを入力として扱うインタフェースを紹介したが、従来の方法では幾つか課題を残していた。

- 木材などにひずみ計測を応用する場合、湿度や温度による膨張や収縮、使用による変形等が生じ特性を悪化させる。

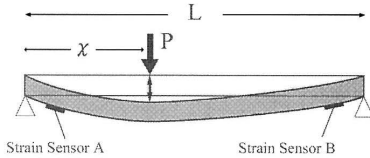


図 5: ひずみセンサを用いた位置推定

- センサは曲げひずみとねじり（せん断ひずみ）を取得可能だが、従来の貼付方法や、アンプ回路による補正では、特にねじり成分について十分な精度を得ることが困難であった。
- 関連して、センサの取得情報を十分に活かしたアプリケーション応用が困難であった。

以下の章では、このような課題とその対策について述べていく。

3. センシングにおける工夫

本章ではセンシングの際のその工夫について述べる。ひずみ計測の応用では、2.4 にて述べたような問題がある。また、信号の増幅に用いるアンプ回路にも様々な種類がある為、センシング精度の向上、長期間展示のための耐久性向上には、それらを加味したセンサの貼付方法やデータの処理の工夫が必要となる。ここで述べる工夫により、センサ精度向上を達成し、次章のねじりに関する実験や、5章で述べるようなコンテンツへの応用が可能になった。

3.1 センサ貼り付け際の手順

センサを貼り付ける際の手順を以下に述べる。図 6 のように、センサは直接平均台に貼り付けるのではなく、金属板を介してセンサを貼り付ける。これは、直接木材に貼り付けた場合、木材の表面の凹凸等により、センサのひずみ感度が低下することを防ぐためである。まず、センサを貼り付ける場所をなるべく水平にする必要がある。貼り付ける場所に凹凸がある場合、センサを貼り付けるとその凹凸に応じてセンサが変形し、初期ひずみとなり、センサの稼働特性を制限することがある。また金属板の準備については、ひずみの伝達をより大きくするため、金属板の厚さはなるべく薄いものが望ましい。さらに平均台の曲げひずみをより大きく伝えるためには、金属板をなるべく長くするのが望ましいが、貼り付ける材料が水平でなければならないので、材料の水平面の確保状況に合わせて長さを調整する必要がある。旧 Log-Log では、金属板の厚さは、0.2mm、大きさ 10mm × 30mm のリン青銅であったが、本稿では、厚さ 0.1mm、大きさ 10mm × 150mm のリン青銅を用いた。

次に、金属板及びセンサの貼付方法であるが、接着剤の接着力確保の為に、紙やすりで貼り付ける材料及び先述の金属板に微小な傷をつけた。今回使用した紙やすりは 800 番で、金属片と丸太を磨いた後、研磨することで生じた金属粉や作業の際についた汚れを落とすため、アセトンで拭取した。

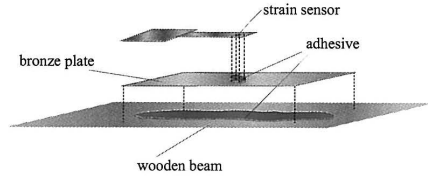


図 6: センサの貼り付け方

接着剤については、平均台という性質上、上に人が乗ったり跳ねたりして振動を加えても、剥がれないように強固に接着でき、更に長期間の展示による温度や湿度の変化に耐える必要がある。また、センサのノイズ対策の一つとして、接着剤には電気絶縁性を必要とする。これらの特性を備えている接着剤として、エポキシ樹脂を採用した。ここでセンサを貼り付ける際に、エポキシ樹脂を多量につけてしまうと、接着剤が緩衝材として作用してひずみの伝達が鈍くなり、センサの特性が低下する恐れがあるため、なるべく少量で満遍なく塗るような工夫が必要である。

3.2 初期ひずみ対策

金属や木材は、温度や湿度の影響を受けて伸縮が生じる。また、長期間展示の場合、継続的な荷重負荷のため変形が生じる。このような変形は、貼り付けたセンサに初期ひずみとして残留し、計測時はこれに応じた電圧が発生する。アンプ回路や A/D 変換器には、入出力電圧のレンジが存在するものが多く、初期ひずみによる電圧と、荷重によって生じるひずみの電圧、そしてオフセット電圧の和が、入力レンジ内になるよう工夫が必要である。

今回使用したアンプ回路のレンジは $-3.27[V] \sim 3.27[V]$ であり、また増幅率によってオフセット電圧が変化する仕様である。初期ひずみや、その増幅率によるオフセット電圧によって、アンプ回路のレンジを逸脱する場合があります。その分のひずみが測定できないという問題が発生する。本システムでは、力をかける方向は 1 方向であるので、理論的にはひずみの方向は自明であるため、その情報は必要ない。よって、加わる力によるひずみによって、アンプ回路のレンジを超える場合、入力極性 (+, -) を変えることにより、荷重によるひずみをレンジ内に収めた。このように、本システムでは、初期ひずみやオフセット電圧の対策として、荷重によって生じるひずみと初期ひずみの差分に絶対値をつけて、データを処理した。

4. ねじり検出

本章では、平均台のねじり成分について、実験と理論値の試算を行い、その結果を検証する。

4.1 ねじりについて

物体に力を加えたとき、その力によるねじりモーメント（トルク）によって、図 7 のように、A 面から $x[\text{mm}]$ 離れた B 面迄の間に $\theta[\text{rad}]$ だけねじり角が生ずる。そのとき図の円柱の半径を $r[\text{mm}]$ とすると $r\theta[\text{mm}]$ だけ、長さの変形

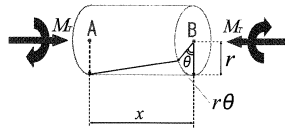


図 7: ねじりの図

が生じたことになる。この時

$$\gamma = r \times \frac{\theta}{x} \quad (2)$$

で表される量 γ をせん断ひずみという。一般にねじり角と、ねじりモーメント（トルク） M_T [N・mm] の関係は、

$$\theta = x \times \frac{M_T}{GI_p} \quad (3)$$

の関係がある。なお、 G はせん断弾性係数 [N/mm²]、 I_p は断面二次極モーメント [mm⁴] である。 G は材質、 I_p は断面の形状によって決定される係数である。

4.2 ねじりの試算

平均台の丸太をおおよそ均一な円柱であると近似し、ねじりに関するモデル計算を行った。

平均台の架橋部の丸太は左右のボルトによって平均台の脚部と固定されているので、両端固定の円柱梁と仮定して計算を行った。また、実際の丸太は上部が乗りやすいように、平らに削られているが、モデル計算では、半径 r [mm] の完全な円柱形として試算を行った。図 8 に、そのモデル図を示す。左の固定点から、 a [mm] だけ離れた位置に荷重 P [N] を加える。その際、Log-Log の架橋部の丸太の厚さを h [mm] として、図 8 に示すように、架橋部上面の最も手前側に荷重をかけたとする。そのとき、固定部から x_a 、 x_b 離れた架橋部の丸太底面で生じるせん断ひずみを計算する。詳しい計算過程は省略するが、図 8 の場合、左のセンサでのせん断ひずみを γ_a 、右センサを γ_b とし、その向きを内側にとると ($L - x_b > a > x_a$) の範囲で、

$$\gamma_a = r \times \frac{L - a}{L} \times \frac{M_T}{GI_p} \quad (4)$$

$$\gamma_b = r \times \frac{a}{L} \times \frac{M_T}{GI_p} \quad (5)$$

と表される。

丸太の長さは 1800 [mm] であり、固定端間の長さ $L = 1500$ [mm] である。また、 $h = 120$ [mm]、 $x = 300$ [mm]、 $r = 800$ [mm] となっている。また P [N] に関しては、4.3 にて行う実験に合わせて、12kg つまり $P = 117.6$ [N]、丸太にかかるトルクは 8.82 [N・m] として計算を行った。2.3 で述べたように、固定端は左端から 150 [mm]、1650 [mm] の位置に存在し、センサの貼り付け位置は左が 450 [mm]、右が 1300 [mm] の位置で、貼り付け方向は図 4 の ϵ 方向が内側を向くように貼り付けた。左右のセンサの位置でのせん断ひずみを図 9 に示す。縦軸はひずみ値、横軸は丸太の左端から荷重点までの距離である。

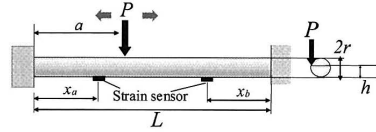


図 8: 両端固定のモデル

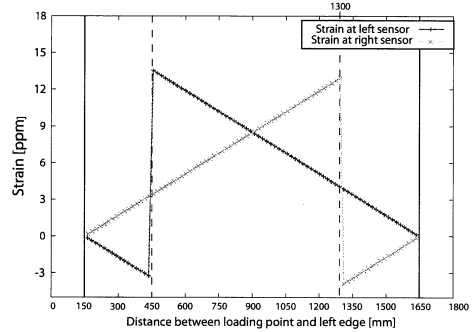


図 9: 左右のセンサでのせん断ひずみ理論曲線

4.3 実験と比較

次にモデル計算との比較を行うため、実際に平均台に荷重をかけて実験をした。今回の実験で使用したひずみセンサの場合、ねじりを γ 、ゲージ率を E_s 、センサの入力電圧を V_{in} [V] とすると、センサからの出力電圧 V_{out} [V] は

$$V_{out} = \gamma E_s V_{in} \quad (6)$$

と表せる。今回の実験では、 $E_s = 52$ 、 $V_{in} = 3.27$ [V] であった。また、アンプ回路の増幅率は、左が 528 倍、右が 393 倍であった。これを利用して、測定データからひずみを推定することが可能である。

今回の実験は加重 P は 12 [kg] の錘を、左の固定端 150 [mm] から右の固定端 1650 [mm] まで、100 [mm] ごとに架橋部の上部手前側から 20 [mm] の位置に置き、センサでせん断ひずみを計測した。なお、センサの貼り付け付近、300~600 [mm] 間と 1200~1500 [mm] 間は 50 [mm] 毎に計測を行っている。計測回数は 40hz で 30 秒間、計 1200 回行い、その平均値を結果とした。その測定結果を図 10 に示す。150、1650 [mm] での線は固定端を、450、1300 [mm] の破線はセンサ貼り付け位置を、375~525 [mm]、1225~1375 [mm] の水色の破線で囲まれた部分は、センサと丸太を介する長さ 150 [mm] の金属板が貼ってある位置である。

図 9 と比較すると、

- モデル計算に比べ左のセンサの値の傾きが小さく、右の固定端に近づいても値が 0 に落ち込まない。
- センサのピーク値が内側に少しずれている。
- きれいな直線とはならず、ねじりの値域も 1/5 程になっている。

という事が挙げられる。これらの原因としては、

- 接着剤等によるひずみの減衰

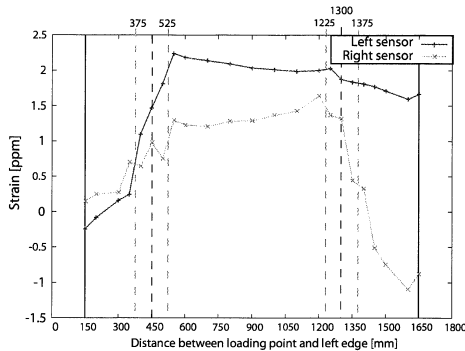


図 10: せん断ひずみの計測結果

- 錘を置く位置の誤差による、トルクの影響
- センサ貼付は金属片を介しており、金属片の上に錘を置いた場合、錘の加重点が面である事などにより、センサに厳密にせん断ひずみが生じてないということ
- 丸太部の固定が頑強ではなく、ねじりが固定部で完全に 0 とはならない
- 丸太部の密度が一定ではなく、弾性係数が位置に応じて変化している
- 実際に丸太は人が乗るためにカットされており、更に丸太部の形状が一定ではないので、断面二次モーメントが理論で用いた値より異なっている

以上のような理由が考えられる。

4.4 ねじりの応用

図 9 より、センサ間であれば、左右のセンサのせん断ひずみの和が一定となるはずである。図 11 に、左右センサの和のモデル計算による値と実測値を示す。なお、図 11 は比較の為、実験から得られたひずみを 5 倍して合わせてある。これは、接着剤や木目などによるひずみの減衰に相当する。図より、理論値においても実測値においても、センサ間に関しては一定に近い値となっている。さて、ここで左右のせん断ひずみの値の和を K と置くと、式 (4) と式 (5) から、

$$K = \gamma_a + \gamma_b = r * \frac{M_T}{GI_p} \quad (7)$$

$$M_T = \frac{K}{rGI_p} \quad (8)$$

より、トルクを容易に求められる。また、2.3 より、平均台の曲げひずみから、図 12 の x 軸での位置と重さを求めることができるので、せん断ひずみを併用すると、平均台上の x - y 平面についての位置推定が可能となる筈である。

図 12 の y 方向について、錘を置いた際の左右のせん断ひずみの和を調べた。測定は $x=600, 850, 1200$ [mm] の三点で行い、 y 方向に夫々 7 等分した間隔に 12[kg] の錘を置いた。計測回数は各点 30 秒間、40hz の 1200 回で、グラフはその平均値となっている。測定結果から得られたせん断ひずみの和 K を先ほどと同様に 5 倍し、式 (8) より求めたトルクから y 軸上での位置推定を行った。結果を図 13 に示

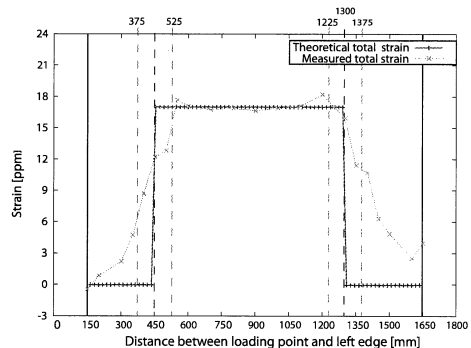


図 11: 左右のセンサにおけるせん断ひずみの和

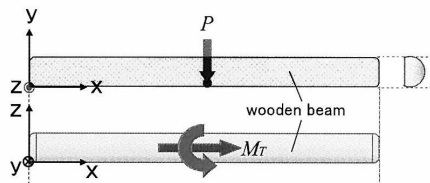


図 12: 平均台における加重点

す。位置推定の際、適切なレンジに収まるように位置推定結果に 3/5 倍の補正をかけている。この補正に関しては、荷重によるトルクは点で与えることができない事による、トルクの計算への影響分であると考えられる。図より y 軸方向での位置を求めることができる。実際には使用者の荷重は足が主体で、これは面で接しているの、その荷重点の位置はバランスによる影響を受ける事になる。

このように、ねじりを併用すると使用者の平均台上 x - y 面での荷重点の位置推定が可能であるという事が確認された。

5. コンテンツと展示報告

5.1 Log-Log のコンテンツ

2.1 で述べたように、Log-Log は平均台型インタフェースと、流体シミュレーションの CG から構成される。平均台上に荷重をかけると、流体 CG の中に荷重の位置の真下の中

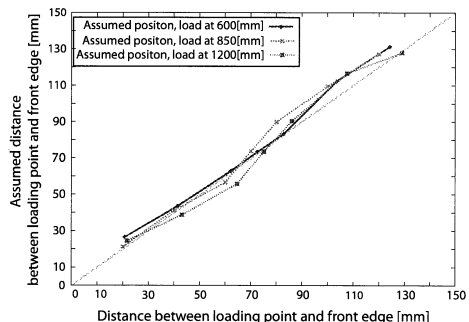


図 13: せん断ひずみを用いた y 軸の位置推定結果

心とした円ができる。この円の半径は、荷重の大きさに比例している。また、この円は流体計算上で障害物として扱われており、平均台に荷重をかけることにより、リアルタイムに川の流れの変化を楽しむ事ができる。

今年度は、アンプ回路とセンサの貼り付け方の改善や、平均台のひび割れ修理、Log-Log 周りのデコレーション、そしてコンテンツの改善を行い、Log-Log2008 として展示を行った。Log-Log2008 と旧 Log-Log とのコンテンツの差をまとめると、以下の点が挙げられる (図 14)。

漂流物 Log-Log においては、川の流れに沿って動く木の葉だけであったが、Log-Log2008 からは、木の葉に加えて、季節に合わせた花を流し、また流体の衝突判定を持つ魚をランダムに動かした。

ねじりの表現 4.4 による結果から、ユーザの丸太上での位置、状態をより解りやすくする表現を試みた。Log-Log では、ねじり値に適当に反応して円が出現する位置が丸太の方向と垂直な方向に微小に変化していたが、Log-Log2008 では、円の形をトルクの大きさに応じて、回転方向に引き伸ばす事で、平均台上での位置を表現した。

5.2 展示報告

Log-Log2008 は、2008/7/26(土)~2008/7/30(水)に開催された予感研究所 2[4] と、2008/9/4(木)~2008/9/9(火)Ars Electronica のキャンパス展 [5] に出展した。図 15 は Ars Electronica での展示の様子である。昨年から特に子供に人気のある作品であったが、Log-Log2008 でも、子供を中心に楽しまれていた。特に Ars Electronica では、ねじりの値で大きく円が変形するようになったので、平均台の上を歩くだけで、左右の足による荷重移動から、平均台の上面のどの位置に体重が乗っているか解り易く、以前に比べて、平均台の上で体を傾けたり、短辺の方向の移動を試したり等、ねじりの入力を試す人が多かった。また、魚を泳がせることにより、人が乗っていない状態でも川の流れに変化が生じるので、平均台の上に座ってじっと眺める子供や、平均台に乗らずに、川の様子を眺めたり、投影された魚を掴もうとする子供がいた。本作品は、平均台の上ののってインタラクティブを楽しむ作品であるので、魚の挙動にも、ユーザからのインタラクティブを設けたりといった、平均台の上で遊びたくなるような工夫が必要である、という課題を残したが、以前に比べてエンタテインメント性の増した作品になったと言える。

6. まとめと今後の展望

本研究では、Log-Log のセンシングに関する改善方法を紹介し、その結果を用いて、せん断ひずみ計測の実験を行った。実験結果から、丸太上の面で使用者位置推定が可能である事を示した。そして、ねじり計測を踏まえたコンテンツの改良とその展示報告を行った。

Log-Log は、“どこでも何でもインタフェース”というコ

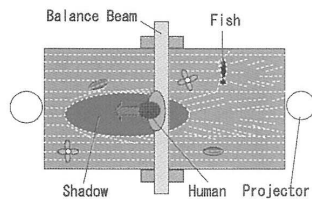


図 14: Log-Log2008



図 15: Ars Electronica での展示の様子

ンセプトを元に、ひずみ計測をインタフェースとして扱うというテーマの作品の一つであった。我々の研究では、タッチパネルから鉄棒、鉄棒から平均台と、ひずみをキーとした人とコンピュータの接点が、より大規模にかつ、環境に埋め込めるような物へと変遷している。よって今後は、本研究で得られた結果を利用し、ひずみを入力とした人とコンピュータ、つまりリアルとバーチャルのより大きな接続を実現するような作品を更に発展させていきたいと考えている。

謝辞 Log-Log2008 を製作するに当たり、東京大学 原島博教授により有益なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 川上翔治ほか：“公園におけるひずみセンシングを用いたインタラクティブメディアの研究,” EC2006 論文集, pp. 67.68, September 2006.
- [2] 天野翔ほか：“重心移動を入力とした平均台型のインタフェース,” 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, 2A3-5, pp. 452.455, September 2007.
- [3] 太田裕之ほか：“機械系センサネット用低消費電力半導体ひずみセンサの開発,” 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.73, No. 729, pp. 666.671, May 2007.
- [4] 高田英明, 金廷炫, 天野翔, 白谷栄梨子, 飯田誠, 苗村健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所): “Log-Log2008,” 予感研究所 2, July 2008. <http://www.media.jst.go.jp/yokan2/index.html>
- [5] 高田英明, 金廷炫, 天野翔, 白谷栄梨子, 飯田誠, 苗村健: “Log-Log2008,” Ars Electronica, September 2008. <http://www.aec.at/en/festival2008/program/project.asp?parent=14383&iProjectID=14470>