

視覚と制御

橋本浩一

koichi@k2.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院
情報理工学系研究科
システム情報学専攻

注意事項

- 出席点について
 - 出席表には本人が署名すること
(筆跡チェックをしているらしい)
 - 意図:
 - 欠席してもかまわないが、不正をしてまで点数をほしがるな
 - 出席点の割合は少ない。よいレポートを書けば取り戻せる。
- 履修届を出していないが履修を希望する人
 - 連絡事項:科類・学年、学生証番号、氏名、連絡先
 - 連絡先:
満洲邦彦教授(工学部計数工学科システム情報コース幹事)

レポート様式と内容

- 4件のレポートの**それぞれ**についてA4版のレポート用紙を使用し、一枚目は右の例の形式で作成する。
- 連絡先はE-mailまたは電話など、レポートに関する問い合わせができる連絡先を記載する。
- 「他レポート」提出状況は、自分が提出したほかのレポートの担当教官名を**すべて**書く。レポート評価集計時の確認に用いる。通常は前半期は1名、後半期は3名記載されるはず。
- ワープロ作成の場合は最下行に**自筆の署名**を行う。

総合科目(一般F)
「インテリジェントな認識と行動のシステム科学」
担当教官:工学部計数工学科 満淵邦彦教授

「視覚と制御」
橋本浩一助教授(1月15日)

理科I類1年 098765 前渡多南
E-mail: tanan@zento.ne.jp
Tel: 03-5841-6900
(他レポート: 中村、奈良、館)

前渡多南



レポート様式と内容

- 2枚目からレポート本文を書く。
- 長さは特に定めないが、1講義あたり3~4枚を一応の目安とする。
- 内容は以下の3部分を含むこと
 - **講義内容の要約**をわかりやすく手短に行い
 - その後講義を聴いて**考えたこと**、講義に**触発されて調べてみてわかったこと**などを中心に論述し、(**参考文献・情報源**を明記)
 - 最後に**講義に関する感想**も添えること
- 注意:4件のレポート(2回に分けて提出)は、**すべて別々に作って提出**。複数をいっしょに綴じないこと。



概要

ビジュアルサーボ

- 基礎理論(制御理論的観点から)
 - * 感度、大域的安定性、構成とロバスト性
- 拡張理論(コンピュータビジョン、自由度の拡張)
 - * アンストラクチャード、ズーム
- 周辺技術(信号処理、ハードウェア)
 - * アーキテクチャ、並列処理
- 応用技術(高速視覚の応用、新たな展開)
 - * オーガナイズドバイオモジュール



周辺技術

アーキテクチャ、並列処理

高速ビジュアルサーボのためのアーキテクチャ

高速センサフィードバックに基づく感覚運動統合システム

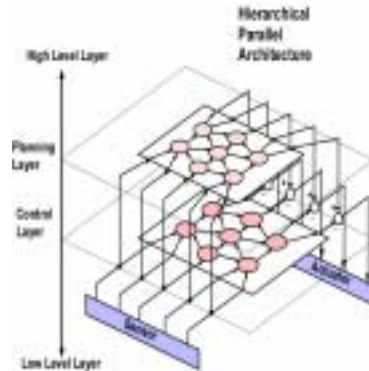
環境の動的な変化に対する**高応答性**
環境の多様な状態に対する**柔軟性**



高速センサフィードバックに基づく
階層型並列処理アーキテクチャ

機械の高速な処理能力

➡ 人間を超える処理能力



 Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

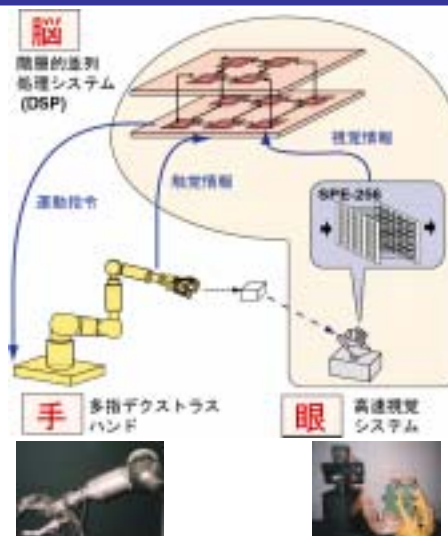
1ms 感覚運動統合システム

DSP階層並列処理システム
(複数の並列処理用DSP)

- ・多数の並列 I/Oチャンネル
(DAC 32CH, ADC 96CH,
PIO 64bit)
- ・高速ビジョンチップシステム
を装備したアクティブビジョン
- ・カセンサ付4本指多指ハンド
を装備した7軸マニピュレータ



視覚と力覚のフィードバック
を1msで実現

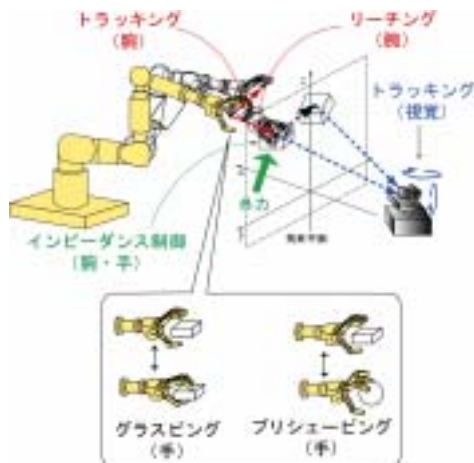


 Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

高速把握システム

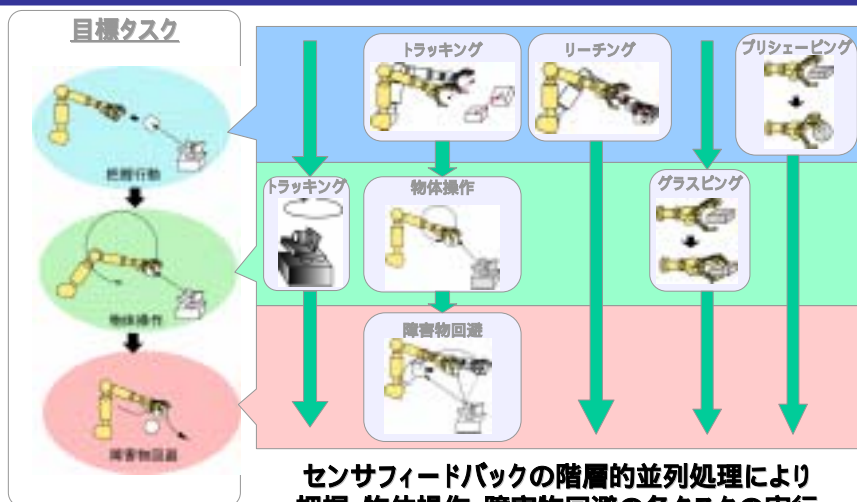
複数のサブタスクの統合によって把握行動を実現

- ・ **アクティブビジョン**
 - ・ **トラッキング**
対象を視界内に捕える
- ・ **アーム**
 - ・ **トラッキング**
手先を対象に追従させる
 - ・ **リーチング**
手を対象に差し伸ばす
- ・ **ハンド**
 - ・ **グラスピング**
対象を把握する
 - ・ **プリシェーピング**
対象の形状に合わせて手の形状を変化する



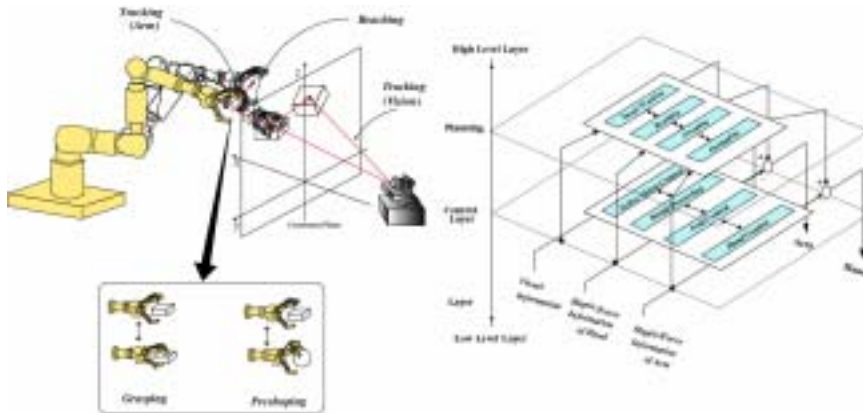

Ishikawa Hashimoto Laboratory
 UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

階層的並列処理に基づく センサフィードバックの統合




Ishikawa Hashimoto Laboratory
 UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

高速把握システム階層図



アクティブビジョン
アーム
ハンド

トラッキング
トラッキング・リーチング
グラスピング・プリシェーピング



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

高速把握行動ビデオ



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

さらに高速な把握



 **Ishikawa Hashimoto Laboratory**
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

高速ハンドシステム



 **Ishikawa Hashimoto Laboratory**
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

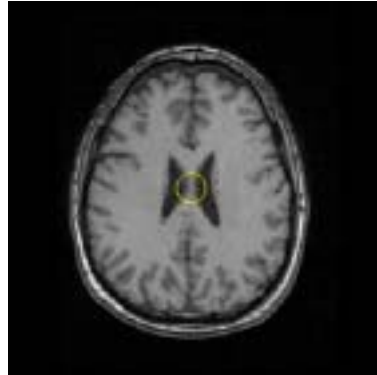
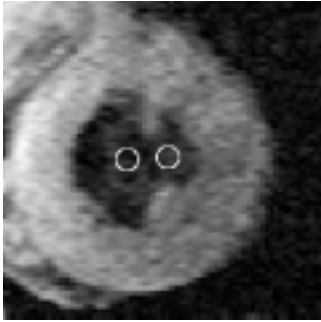
バッティングロボット



バッティング(スロー)



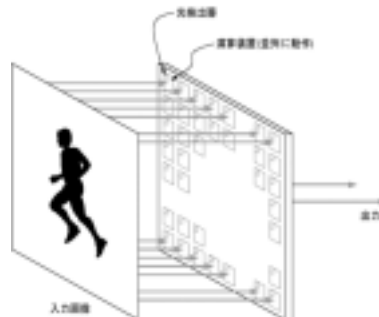
ビジョンチップでスネイク(2003)



 Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

ビジョンチップ

- 光検出器 (PD) と処理回路 (PE) を一体化し, 画素ごとに完全並列に処理を行うことで高速な処理を実現.
- 4 近傍のメモリの値を参照することが可能.
- 総和演算回路により, 高速にモーメントが計算可能.



 Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

動的輪郭モデル

- 以下のエネルギー E を最小化する曲線 C を求める問題として定式化される。

$$E(C) = \underbrace{\int_a^b \alpha |C'(q)|^2 + \beta |C''(q)|^2 dq}_{\text{内部エネルギー}} + \underbrace{\int_a^b g^2 (|\nabla I(C(q))|) dq}_{\text{外部エネルギー}}$$

エネルギー

=

内部エネルギー

+

外部エネルギー

曲線が滑らかであるほど
小さくなる

画像の明るさの勾配が
大きいほど小さくなる



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

従来の内部エネルギー

- 従来の動的輪郭モデルでは内部エネルギーとして曲線の長さを用いていた。

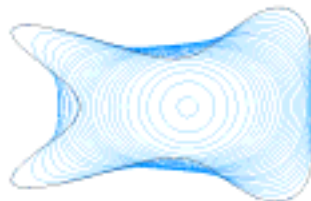
$$E_{\text{int}} = \text{Length}(C) = \int_a^b |C'(q)| dq$$

エネルギーを最小化するように曲線を移動させるには、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \kappa N$$



曲線を更新する際に
曲率を計算する必要がある



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

提案する内部エネルギー

- 関数 $\phi(x, y)$ を用いて, 以下のように内部エネルギーを定義する.

$$E_{\text{int}} = \int_{\Omega} |\nabla\phi|^2 \, dx dy \quad \text{膜の弾性エネルギー}$$
$$= \int_{\Omega} \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 \, dx dy$$

エネルギーを最小化するように $\phi(x, y)$ を更新するには,

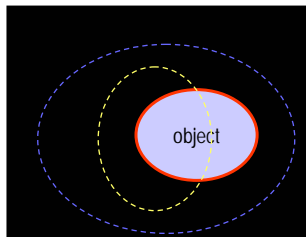
$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \nabla^2\phi \quad \rightarrow \quad \text{曲線を更新する際に, 曲率の代わりにラプラシアンを計算すればよい}$$

外部エネルギー

- 画像の勾配情報を用いずに, 以下のような領域分割に基づくエネルギー [Chan 2001] を用いる.
(計算量の削減のため, 2 乗のところを絶対値のみとした)

$$E_{\text{out}} = \int_{\Omega} |I - c_1|H(\phi) + |I - c_2|(1 - H(\phi)) \, dx dy$$

image



$H(\phi)$: Heaviside 関数
 c_1 : 内側の画素の平均値
 c_2 : 外側の画素の平均値

\rightarrow 赤い曲線がエネルギー最小

提案するエネルギー

- 提案するエネルギーは以下のとおりである.

$$E = \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} |\nabla\phi|^2 dx dy$$

-----内部エネルギー-----

$$+ \beta \int_{\Omega} |I - c_1|H(\phi) + |I - c_2|(1 - H(\phi)) dx dy$$

外部エネルギー

- このエネルギーを最小にするため, Euler 方程式を最急降下法を用いて解くことにする.

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \alpha \nabla^2 \phi - \beta \delta(\phi)(|I - c_1| - |I - c_2|) \quad \delta(\phi) \approx \frac{1}{1 + |\phi|}$$



曲率の代わりにラプラシアンを計算すればよく,
ラプラシアンは4近傍の値を用いて容易に計算可



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験装置

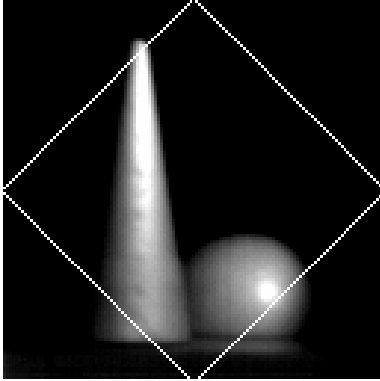
- ビジョンシステムとして CPV-II を使用し, CPV-II の制御用には PC を用いた.
- CPV-II システムでは, フレームレート 1kHz で, 画素数 128 × 128 の 8bit 画像を処理可能である.



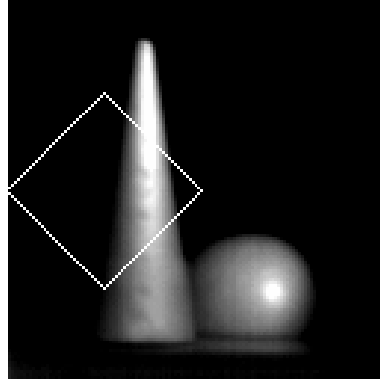
Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験結果

1

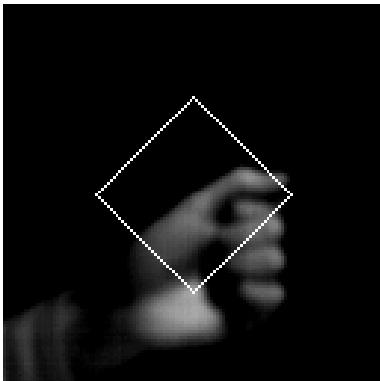


2



実験結果

3



動画像への対応

- エネルギーに新たな項を追加する.

$$E = \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} |\nabla \phi|^2 dx dy$$
$$+ \beta \int_{\Omega} |I - c_1| H(\phi) + |I - c_2| (1 - H(\phi)) dx dy$$
$$+ \frac{\gamma}{2} \int_{\Omega} \phi^2 dx dy$$

- エネルギーを最小化するには,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \alpha \nabla^2 \phi - \beta \delta(\phi) (|I - c_1| - |I - c_2|) - \gamma \phi$$



新たに追加された項により、 ϕ の絶対値が低く保たれるため、画像の変化に対応可能となる。



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験

- ロボットハンドの1本の指に白いテープを貼り、指を周期運動させた。
- PCに画像を転送した場合は実行周期が遅くなってしまうため、以下の2通りの実験を行った。



1. (画像モニタ)

PCに画像を転送し、実行周期は100ms、指は0.1Hzの周期運動

2. (パフォーマンス測定)

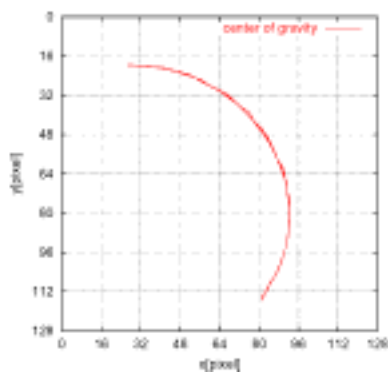
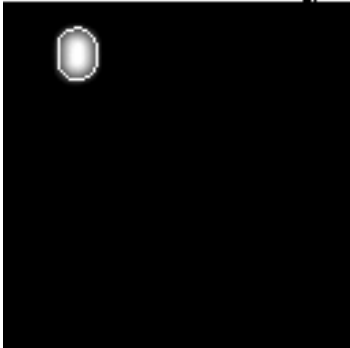
PCに画像を転送せず、実行周期は1ms、指は8Hzの周期運動



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験結果 (1/3)

1. 画像モニタ



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験結果 (2/3)

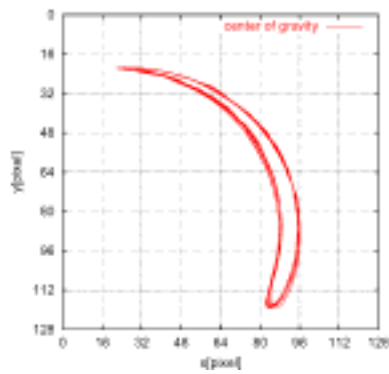
2. パフォーマンス測定



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

実験結果 (3/3)

2. パフォーマンス測定



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

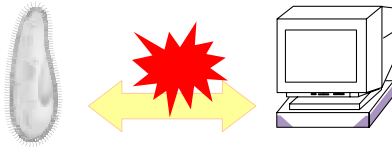
オーガナイズドバイオモジュール

背景

- 生物の構造はマイクロ・ナノマシンとしての特徴を有する
 - モータ蛋白 例) ミオシン (筋肉)
 - 受容器 例) ロドプシン(網膜)

微生物をマイクロマシンとみなし、機械系のように制御したい

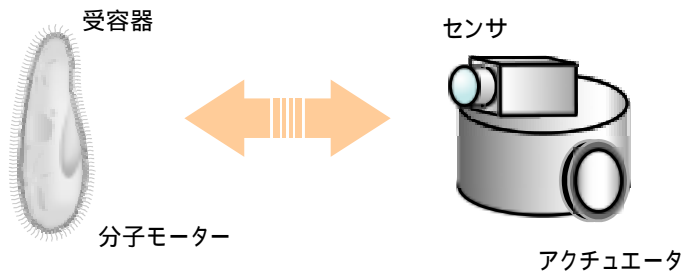
- 情報処理機構と微生物とのインターフェースの確立
- 微生物対象の制御手法がない



生物対象をコンピュータと接続して制御する手法が重要

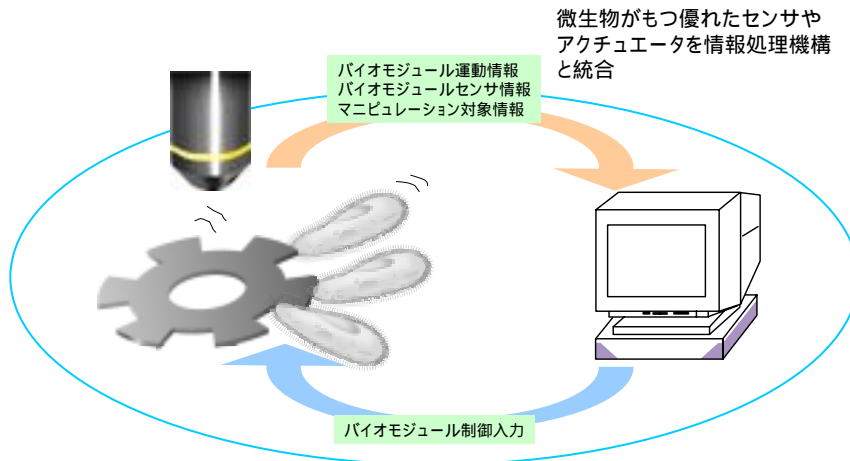
バイオモジュール(Bio-Module; BM)

バイオモジュールとは



微生物の一個体を「センサとアクチュエータが統合された一単位の行動体」と考え、バイオモジュール(Bio-Module; BM)と呼ぶ

オーガナイズドバイモジュール (Organized Bio-Modules; OBM)



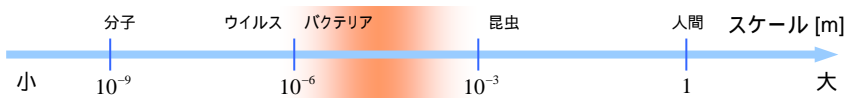
柔軟かつ多様な機能を提供する
超大規模マイクロシステムの実現



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

バイモジュール

バイモジュールに要求される仕様



- 大きさ 1 ~ 100 mm程度 ↓ 集団の計測が、顕微鏡により容易に実現可能
- 定位反応を有する ↓ 運動指令を与えることが容易

定位反応

- 刺激源の位置や方向に対して、定位しながら移動する反応
- 走性, タキシス(taxis)

繊毛虫は一般に仕様を満たす傾向にある



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

バイオモジュールとしてのゾウリムシ

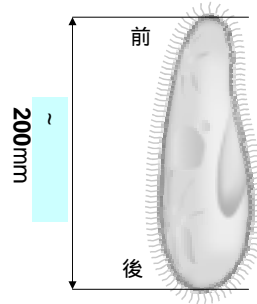
ゾウリムシ (学名: *paramecium caudatum*)

原生物界 繊毛虫類 梁口綱 ナスラ亜綱 ゾウリムシ目 ゾウリムシ属

- 体を覆う繊毛を鞭のように打つことで運動する
- 繊毛運動は細胞内電位により制御されていると考えられている
- 主な刺激源とそれに対する反応
 - 機械的の刺激(触覚) – 逃走反応(後部), 回避反応(前部)
 - 重力 – 負の走地性: 上方向に泳く
 - 電場 – 負の走電性: 負電荷方向に泳く **定位反応**
 - 温度 – 25 °C の領域から出ようとする回避反応がおこる
 - PH – 弱酸の領域で方向転換頻度が増大する

ゾウリムシはバイオモジュールの仕様を満たす

内藤 豊: 単細胞動物の行動 – その制御のしくみ, 東京大学出版会, 1990



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

ゾウリムシ – センサ情報計測

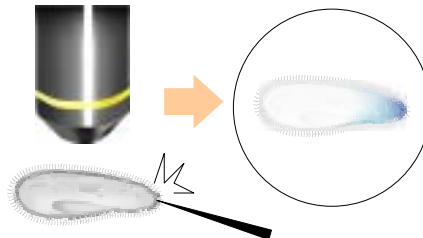
センサ情報計測

- バイオモジュールの受容器が感知した情報を制御用コンピュータにフィードバックすることで, センサフィードバックの実現をめざす
- 受容器が感知した情報は, 適切な蛍光プローブを用いることで外部から非接触で測定可能
 - すべての受容器の情報について適用できるわけではない

例: Ca^{2+} プローブによる前部機械刺激計測

前部に刺激をうけて回避反応が起こる場合に細胞内 Ca^{2+} 濃度が急激に増加する
 Ca^{2+} を可視化することで触覚刺激を計測可能

ゾウリムシの知覚した刺激は可視化することで計測可能



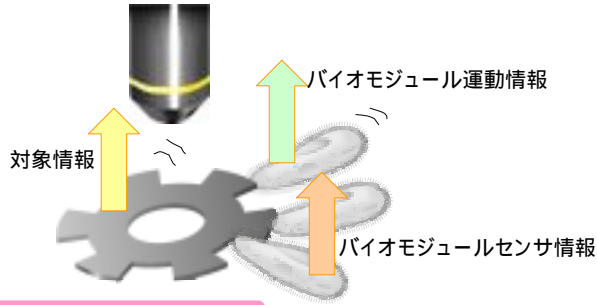
Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

バイオモジュールとビジュアルフィードバック

バイオモジュールの情報計測

画像によるバイオモジュールの計測の利点

- 非接触
- 高精度
- バイオモジュール群の同時計測が可能
- バイオイメージング技術の発達 – 機能分子
蛍光分子で細胞の特定部位を可視化し、受容器で知覚された情報を計測可能

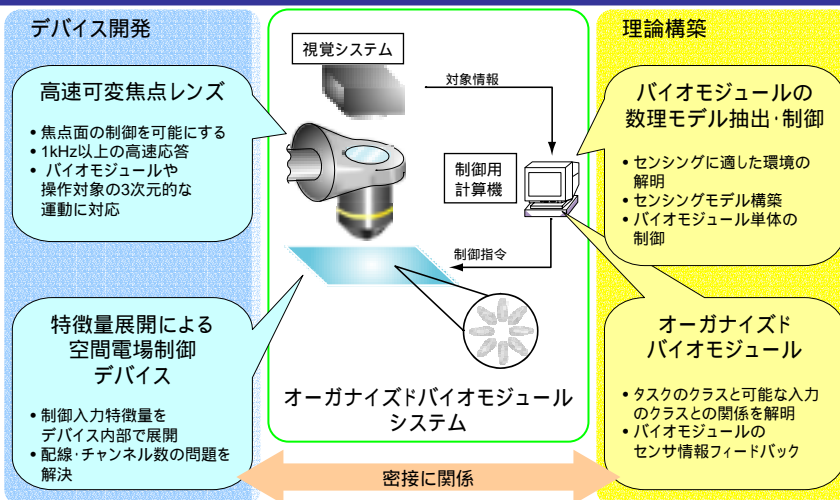


ビジュアルフィードバックが制御手法として最適



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

オーガナイズドバイオモジュール(OBM)システム

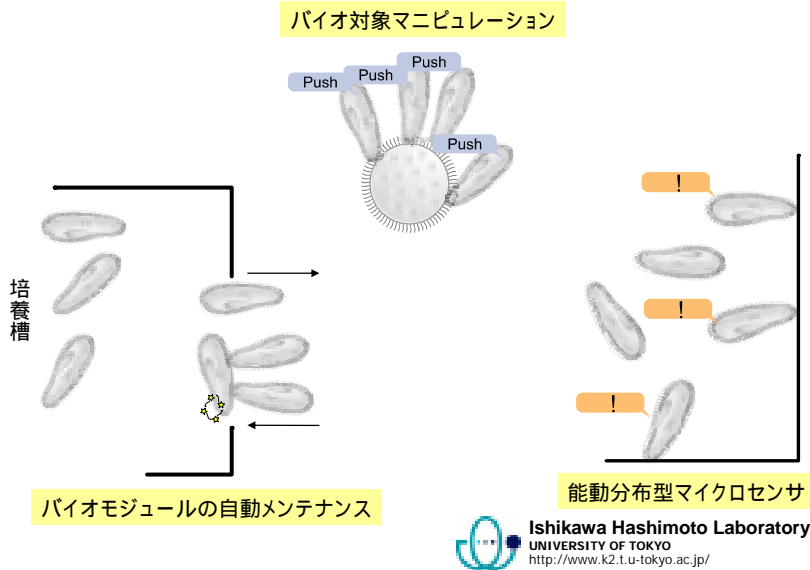


オーガナイズドバイオモジュールシステムによる
高度なマイクロシステムの実現



Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

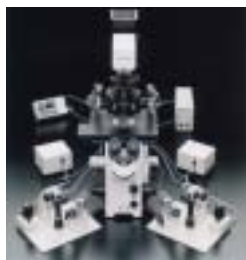
OBMシステムにより実現される成果



応用が期待される分野

OBMのアプリケーションとして期待される分野

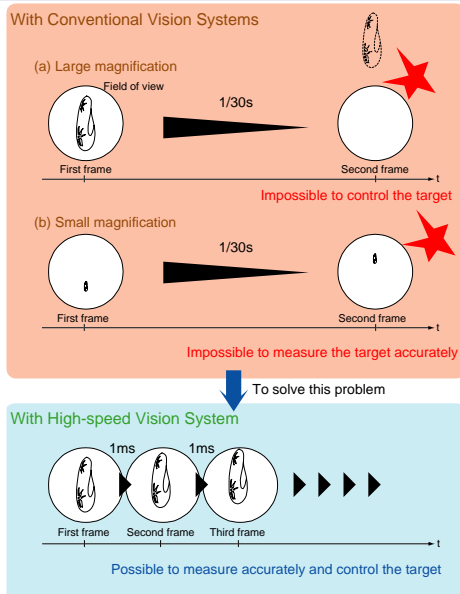
- 医療
 - 人工授精(ICSI)における卵細胞操作
 - ドラッグデリバリーへの応用
- 農学
 - DNA操作にともなうマイクロインジェクションの補助・自動化
- 生命工学
 - 細胞個々の物理的な操作や分別
- 工学
 - MEMS組み立てへの応用



微生物トラッキングシステム

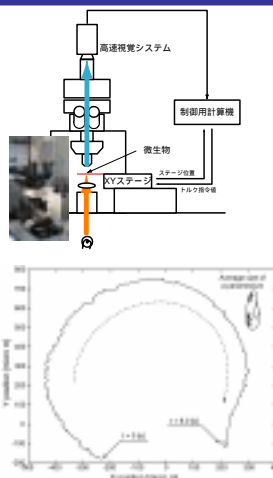
運動する微生物の観測

- 運動する微生物は一般に高速
 - 例 バクテリア 1秒間に体長の50倍移動
- 個体の継続的な観測が困難
- 像面における対象の見かけの速度が高速



微生物トラッキングシステム (2000)

- ビジュアルサーボ
- 高速視覚(約780 [frame/s])によるビジュアルフィードバック
- 微生物としてゾウリムシを用いた



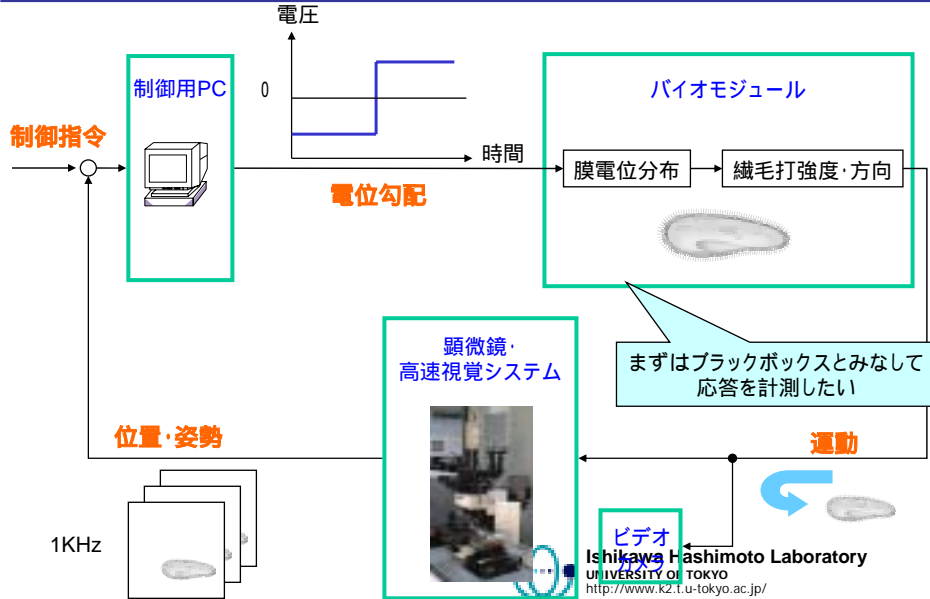
Tracking a Paramecium Experiment
using Micro Visual Feedback

Ishikawa Hashimoto Laboratory

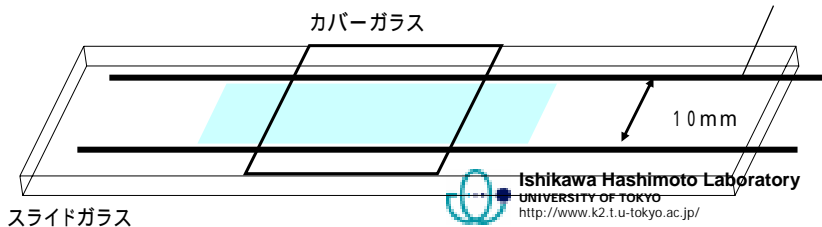
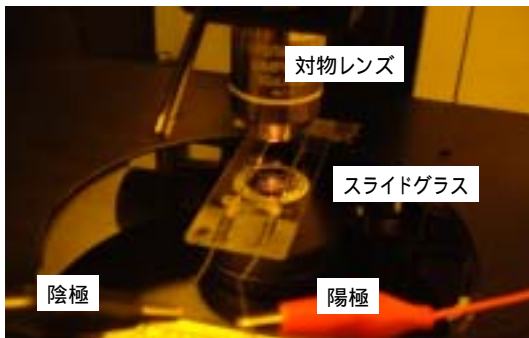
自由に泳ぐゾウリムシ個体を視野内に安定して捕捉しつづけることに成功した

Ishikawa Hashimoto Laboratory

OBM制御システム実現のための応答計測



ゾウリムシ制御用1次元電極(プロトタイプ)



ゾウリムシ！



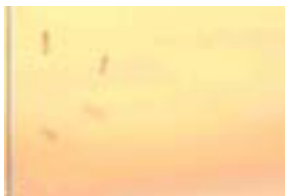
Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

電圧印可実験による基礎特性調査

● 電圧勾配 2.0V/cm



● 電圧勾配 3.0V/cm



● 電圧勾配 5.0V/cm



- 電圧勾配が小さすぎると反応はよくない

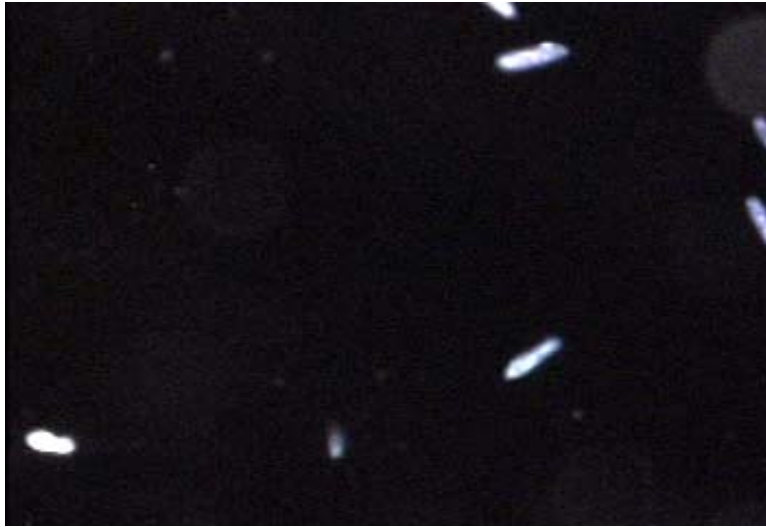
- 電圧を上げすぎるとゾウリムシに異常が生ずる
- 個体差が大きい

- 電圧勾配が大きくなるにつれて反応性、遊泳速度ともに増加
- 同時に左右のふれも増大する



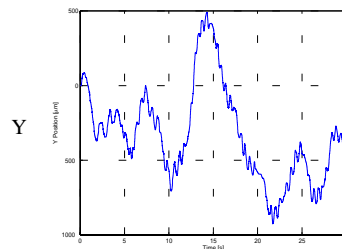
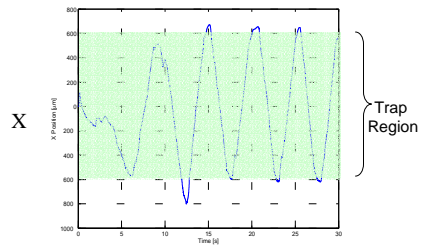
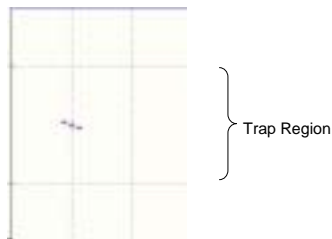
Ishikawa Hashimoto Laboratory
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

暗視野における電圧印加



 **Ishikawa Hashimoto Laboratory**
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

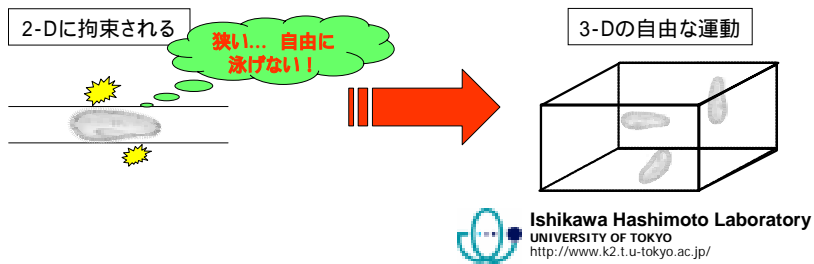
ビジュアルサーボによるトラップ(2003)



 **Ishikawa Hashimoto Laboratory**
UNIVERSITY OF TOKYO
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

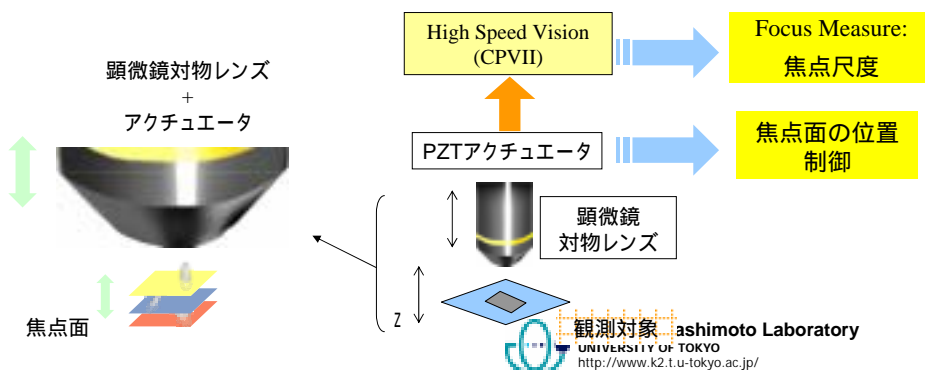
研究動機

- ・ 2次元のトラッキングには限界
 - ・ 対象の3次元的な運動には対応できない
 - ・ 対象の運動を完全に2次元に閉じ込めることは難しい
- ・ 3次元トラッキングを実現することで
 - ・ 対象の3次元的な運動に完全に対応
 - ・ 将来的には対象の3次元的な形状・姿勢の観測にも応用可能

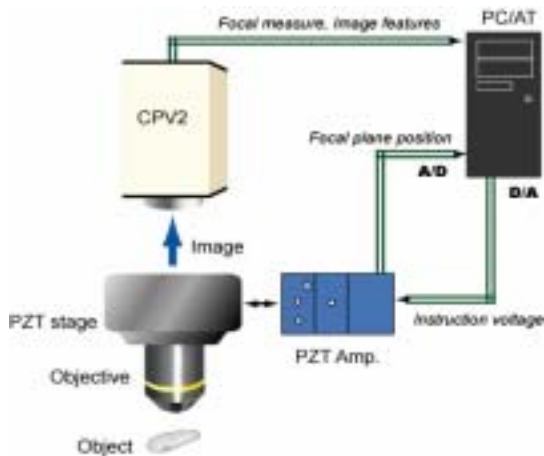


奥行き測定手法

- ・ 焦点面を奥行き方向にスキャンして対象位置を測定する
 - ・ 無限遠補正対物レンズの位置を光軸方向にスキャンする
 - ・ 各焦点面での画像をから処理し, 特徴量を抽出
 - ・ 特徴量のプロファイルから対象の奥行き位置を計測する



実験システム構成

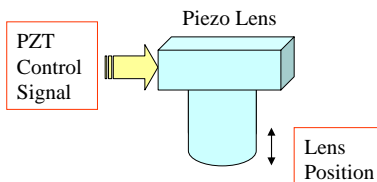


- 顕微鏡
 - 20x 対物レンズ
- 対物レンズアクチュエータ
 - PZT
 - 可動範囲: 350 [um]
 - 共振周波数: 100[Hz]@150[gr]
 - 位置決め精度 (closed/open loop): 10/3 [nm]
- 高速視覚システム
 - CPV2: 1000 [fps]
- 制御用PC
 - Pentium III 800 [MHz]

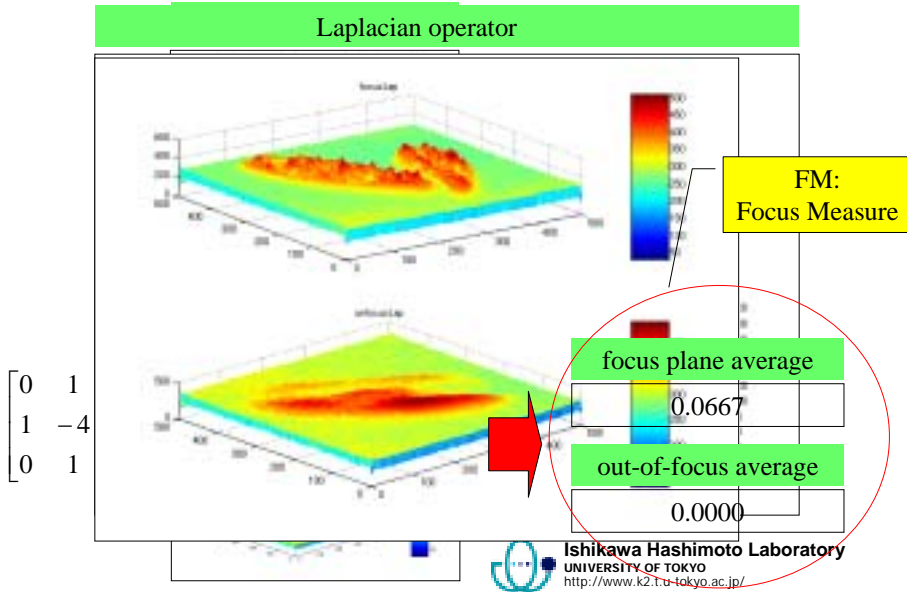
PZT “Focus-Adjustable” Lens



- Nominal Expansion : 350 [um]
- Nominal Operating Volt : 100 [V]
- Sensor Type : Capacitive Sensor
- Resonant Frequency : 100 [Hz]@150[gr]
- Settling Time : 20~30[ms]
- Resolution (closed/open loop): 10/3 [nm]

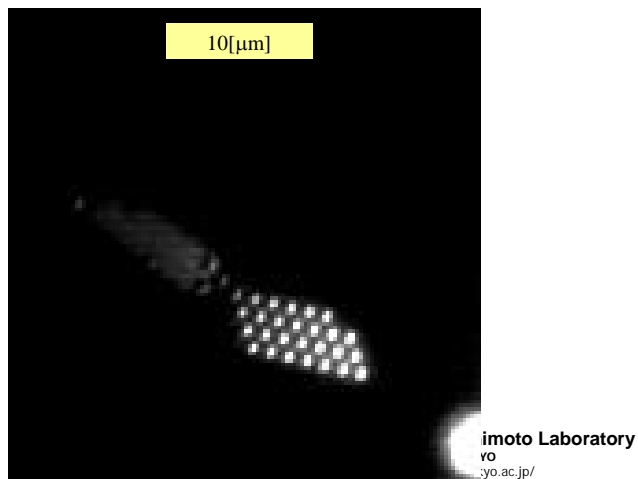


Focus Measure

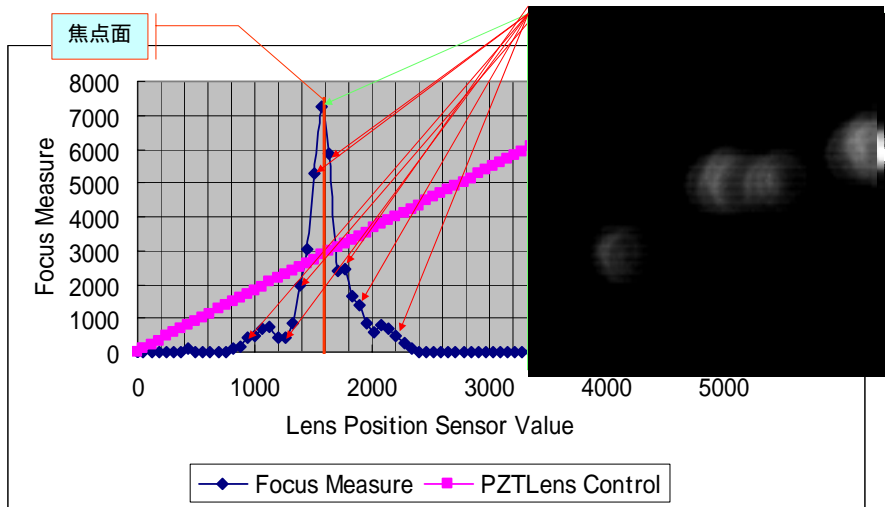


Focal Measure 有効性確認実験

- 対象物 : Particle-Size Standard, Polymer Microsphere 10
- 顕微鏡の暗視野観察法



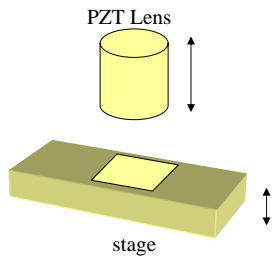
焦点面尺度(Focus Measure)の評価



奥行き方向トラッキング手法

- 顕微鏡の特性上, 対象が焦点面からずれていることは検出できても, どちらにずれているのかは画像からは判断できない
- 2種類の手法を評価
 - 対象が焦点面から外れたら上下にスキャンして探す手法
 - 常に焦点面をスキャンをして対象位置を測定しつづける手法

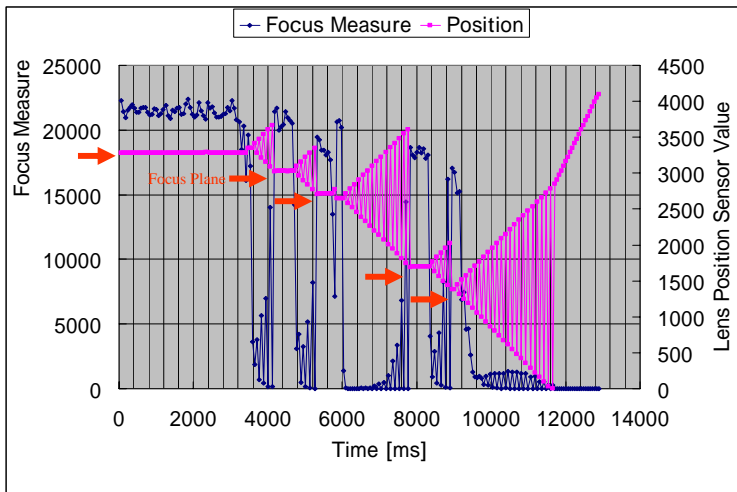
自動焦点調整の実験映像



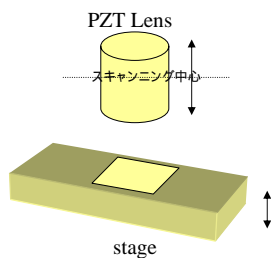
人がステージを上下に動かす
対象位置が変化しても常に焦点面に合わせる



Trace of Lens Position and Focus Measure



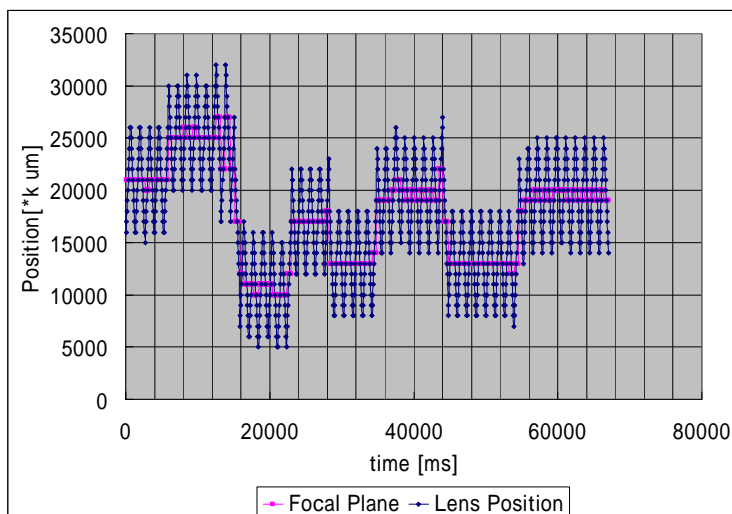
実験映像:連続焦点面検出



人がステージ位置を
上下に動かす
それに合わせてスキ
ャニング中心が変
化する



焦点面およびレンズ位置



高速視覚システムと制御

- 高速視覚システムの実現
 - 現在の視覚システムの問題点
 - どのような解決法があるか？
 - どこまで進んでいるか？
- 制御
 - 高速ビジョンを用いることのメリット
 - ほかのセンサとの違い
 - どこまで進んでいるか？