
知能制御システム学

高速視覚システムと
高速ビジュアルフィードバック

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡 慎吾

swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

2007.04.10

ビジュアルサーボ

サーボ?

→ 位置や角度などを制御すること

ビジュアルサーボ?

→ カメラからの画像情報を使って, カメラやロボットなどの位置・姿勢を制御する枠組み



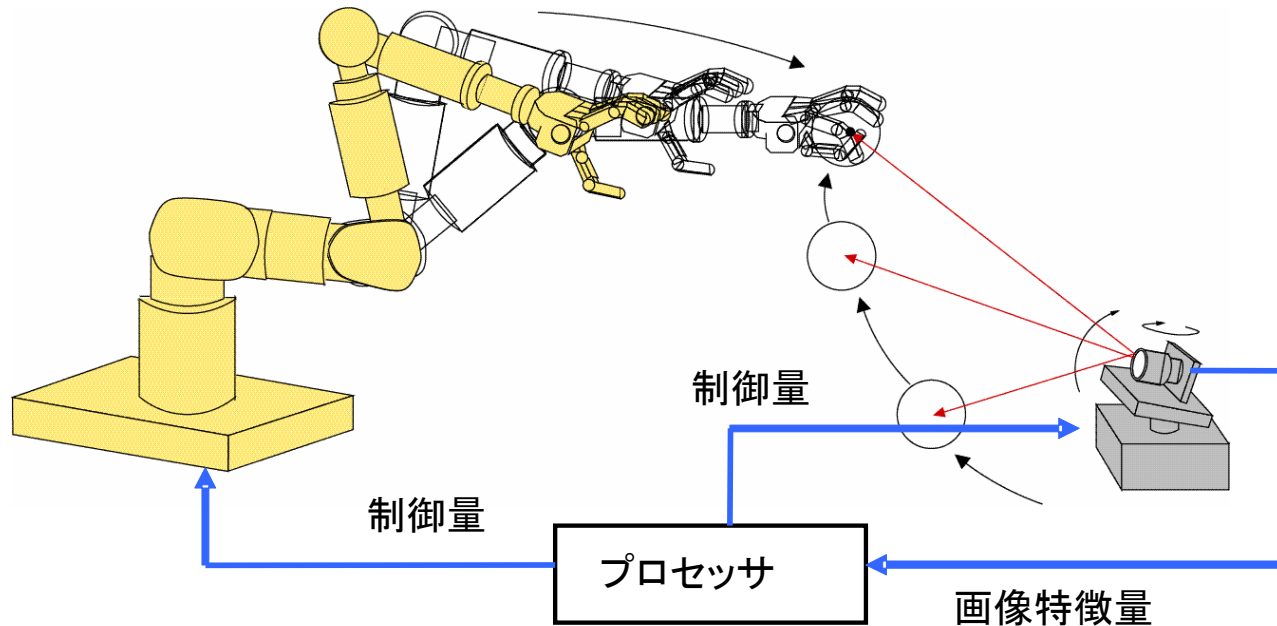
今はこう見えている.
このカメラを,



こういう画像が
見えるように
動かしたい.

さてどうする?

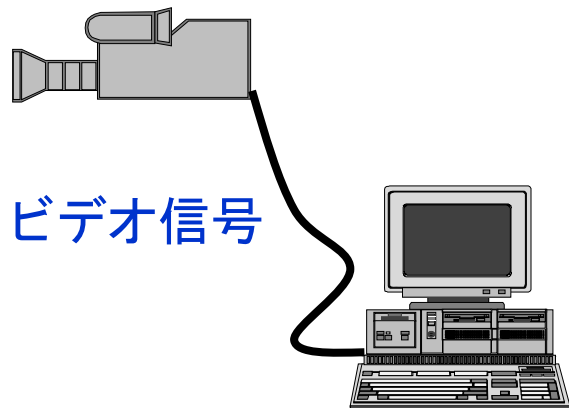
ビジュアルサーボのための要素技術



以下の内容を扱う

- 視覚センシング技術 (イメージセンサを中心として)
- 視覚処理技術
- リアルタイム処理技術 (スケジューリングアルゴリズムを中心として)

「高速」かつ「リアルタイム」なビジョンシステム



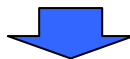
従来の視覚処理システム:

- CCD等のイメージセンサ+コンピュータ
- 30~60 フレーム/秒
- 高速な動きをとらえることができない

高速ビデオカメラの世界
(> 1000フレーム/秒)

+

リアルタイム視覚処理

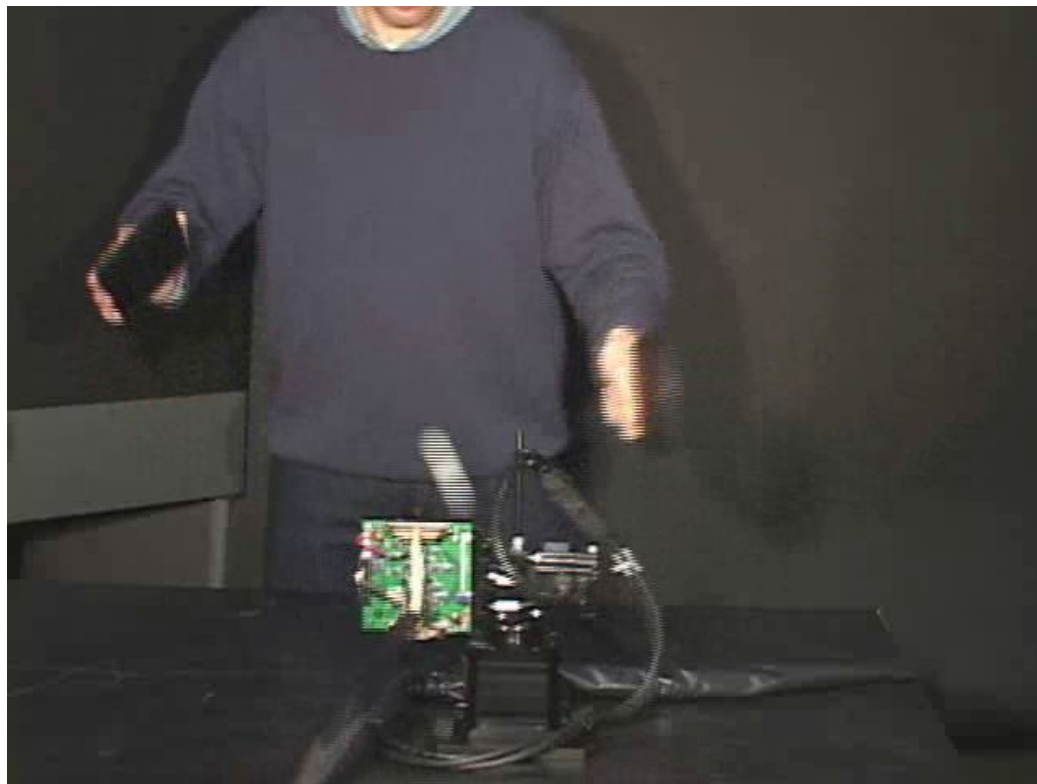


高速リアルタイムビジョン

 [Photron]



高速対象追跡のデモ

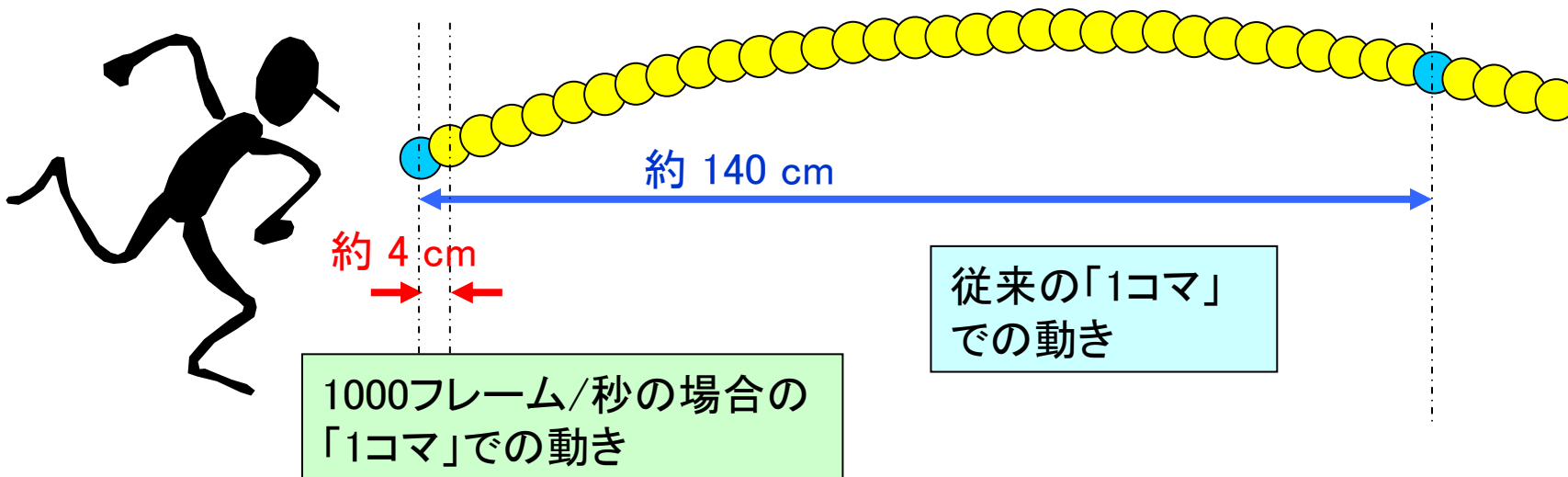


対象を視野の中心で捉えるように、カメラのパン・チルトの2軸を高速に制御（視覚フィードバック制御）

[中坊1999]

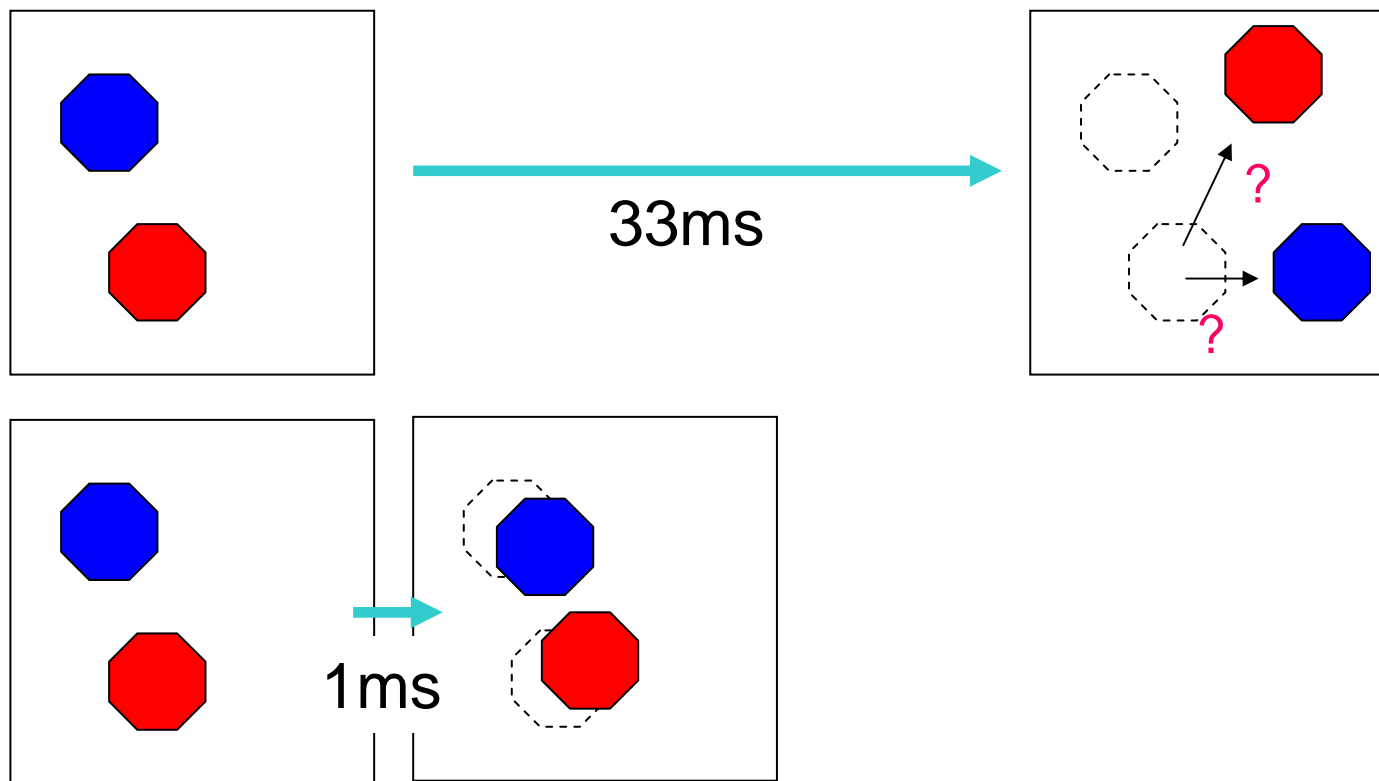
なぜ高速ビジョンか？

時速 150 km/h の速球



高速な動きを确实・正確に認識できる

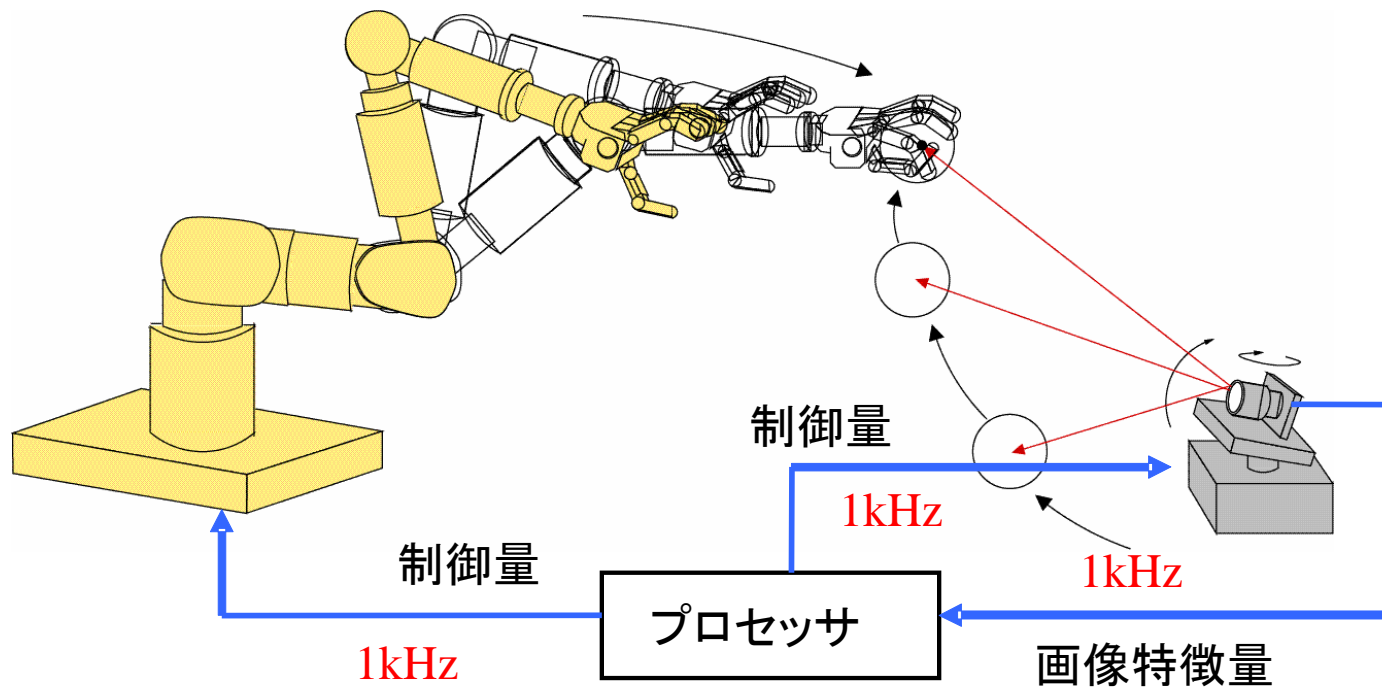
なぜ高速ビジョンか？



画像処理が簡単になる → さらなる高速化が可能

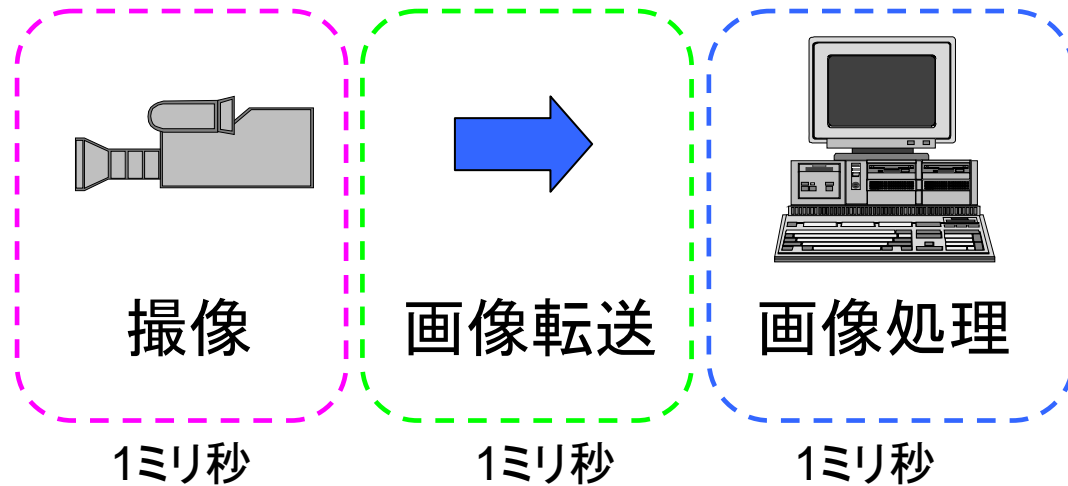
[石井1999]

なぜ高速ビジョンか？



視覚フィードバック制御に十分なレート

高速ビジョンシステム実現のためには

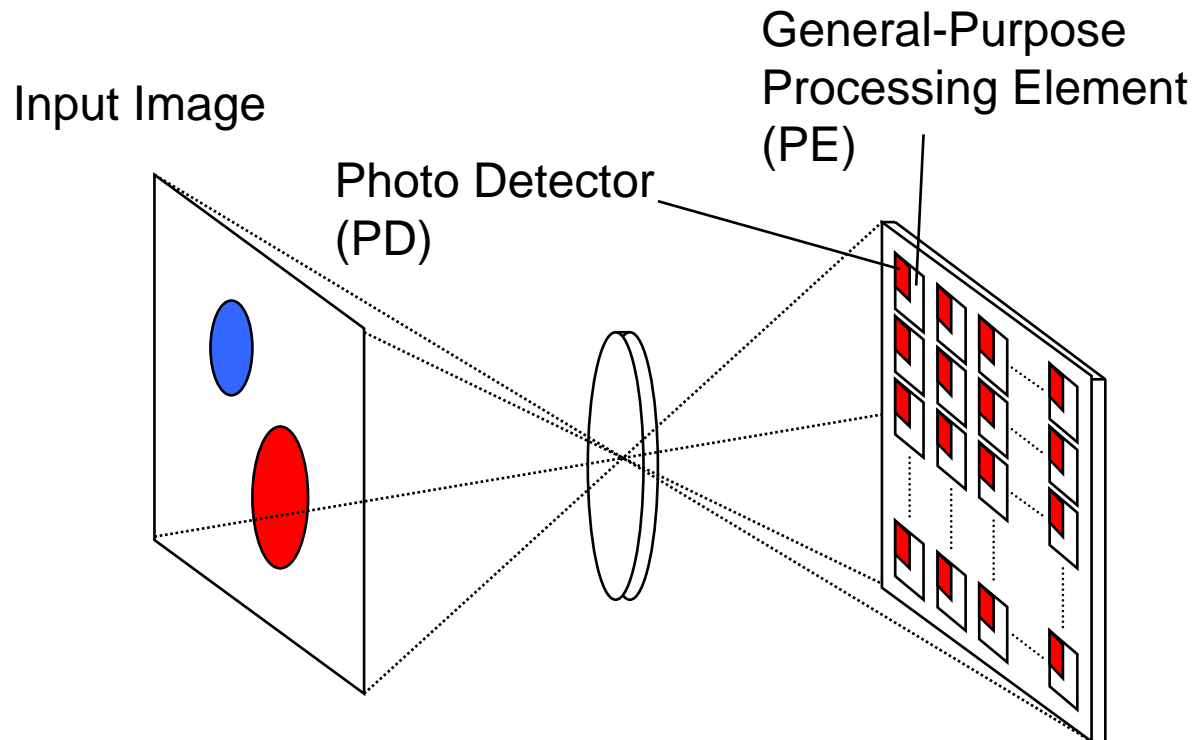


すべてを高速化しなければならない
(高速化されない部分がボトルネックになる)

我々の2つのアプローチ:

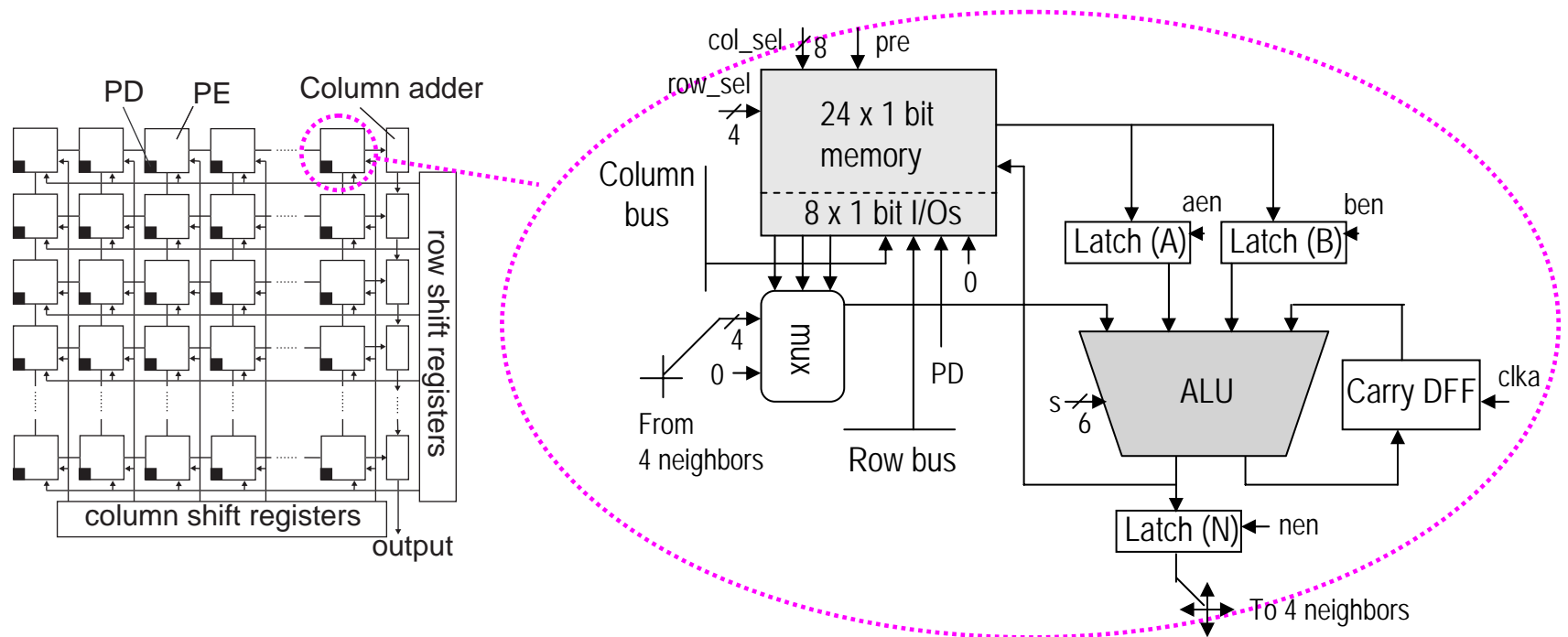
- 高速イメージセンサと並列画像プロセッサをワンチップ化
- 高速イメージセンサと並列画像プロセッサ間で高速転送を実現

「ビジョンチップ」によるアプローチ



- CMOSイメージセンサの各画素に処理回路を集積
- 「画像の転送」がそもそも不要
- 小型・ワンチップ

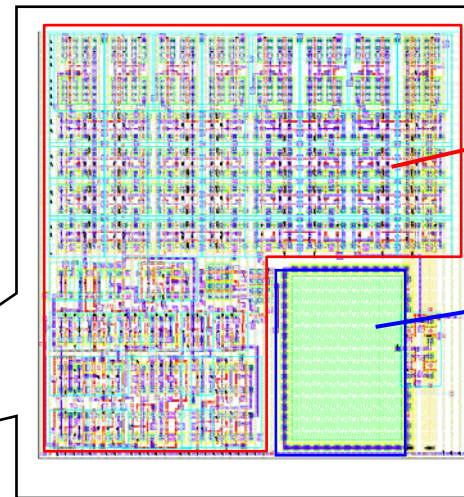
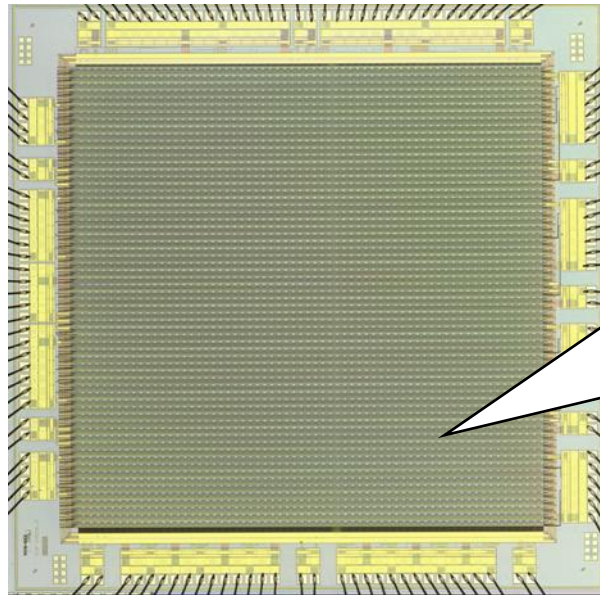
ビジョンチップの構造



- CMOSイメージセンサ → 処理回路の集積が容易
- 各画素に、デジタル処理回路を集積
- 与えられた命令を、全画素が同時に実行 (SIMD型並列処理)
- プログラムによって、さまざまな画像処理を実現

[小室2003]

ビジョンチップ V5.1



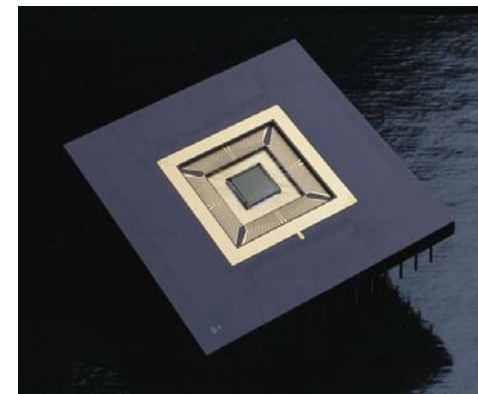
処理回路

受光部

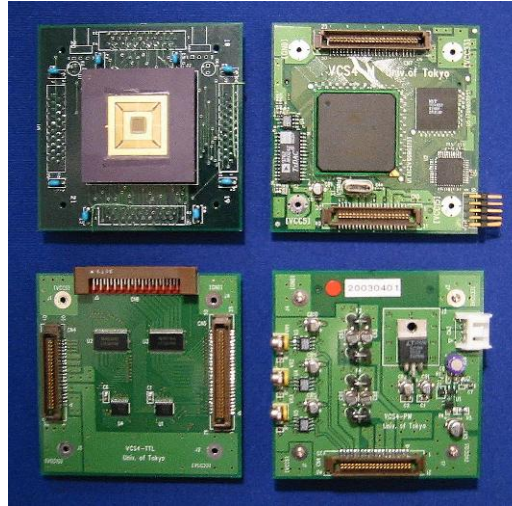
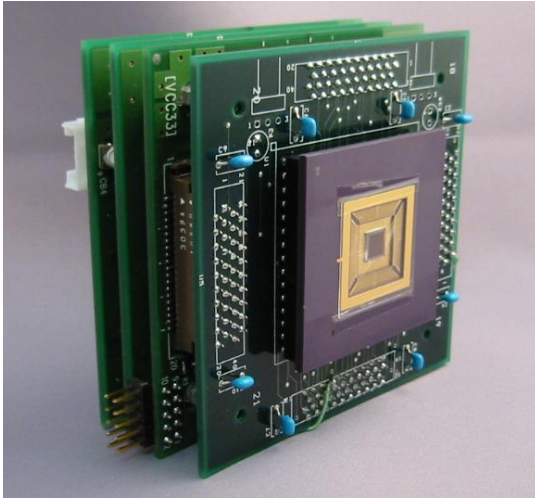
(1画素の拡大)

- ・ 0.35 μm CMOS プロセス
- ・ 64 × 64画素
- ・ pixel area: 67.4 μm × 67.4 μm
- ・ chip area: 5.4mm × 5.4mm

[小室2003]



視覚処理システム VCS-IV



XILINX XC2V1000 を使用

- 専用コントローラ，電源回路，インタフェース回路などをモジュール化，必要に応じてスタックして利用
- FPGA を利用

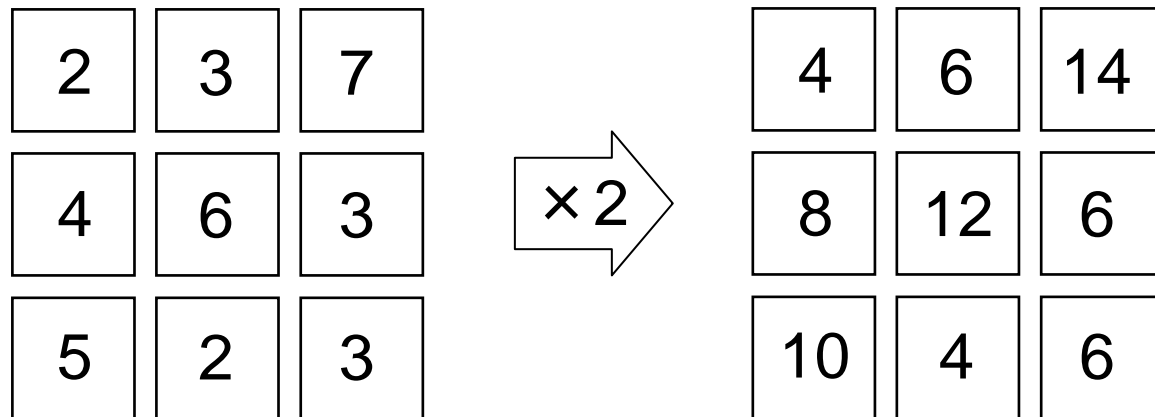
[鏡2005]

SIMD型並列処理

Flynn による分類

- Single Instruction Stream, Single Data Stream (SISD)
- Single Instruction Stream, Multiple Data Stream (SIMD)
- Multiple Instruction Stream, Single Data Stream (MISD)
- Multiple Instruction Stream, Multiple Data Stream (MIMD)

SIMD 型の画素並列処理



典型的な画像処理: フィルタ演算

ある画像処理の出力(を構成する任意の画素値)が,
(その画素の)近傍の入力画素値のみから計算できるようなとき,
その処理をフィルタ演算, フィルタ処理などと呼ぶ

例: 線形フィルタ:

(近傍を, その画素を中心として $(N+1) \times (N+1)$ 画素と定義)

$$y(m, n) = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N a(i, j) x(m + i, n + j)$$

$a(i, j)$ を変えるといろいろな処理ができる

3x3 線形フィルタの例

エッジ検出の例

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

単純な水平方向
1次微分

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

単純な垂直方向
1次微分

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

注目画素の近くに重み
(Sobel フィルタ)

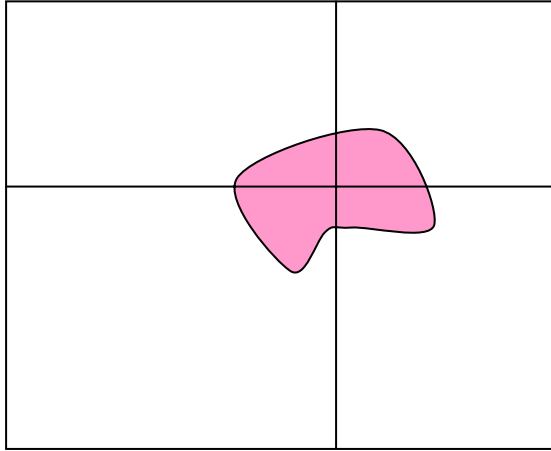
平滑化の例

1	1	1
1	2	1
1	1	1

0	1	0
1	4	1
0	1	0

非線形なものも含めて、
SIMD型画素並列処理
で高速に実行できる

典型的な画像処理: 位置検出



例えば, 重心の位置
(これが画面の中心に来るようにカメラを動かせば, 対象追跡になる)

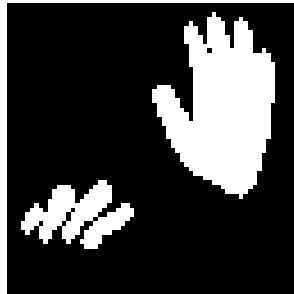
計算例: 2値画像 (画素値が 0 or 1) の場合,

- 画素値が1である画素の画素値を, x 座標の値に書き換える
- 全部の画素値の総和を計算する
- 画素値が1だった画素の数で割る
→ x 方向の重心

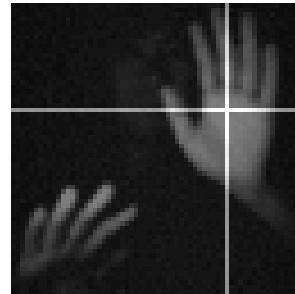
ビジョンチップの視覚処理結果



6-bit グレイスケール



2値化

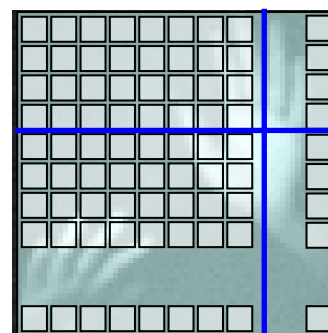
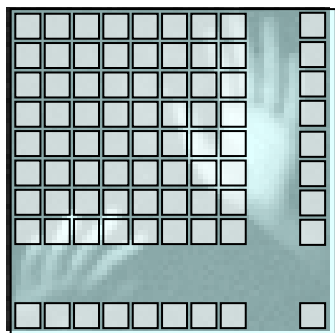


重心検出



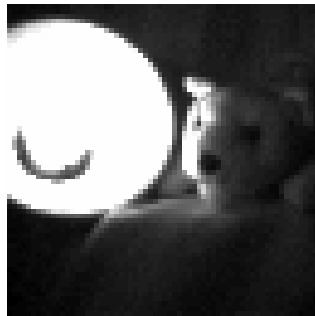
動き検出

さまざまな画像処理を実行 → 対象の位置, 大きさ, 向きなどの
「特徴情報」をチップから直接出力できる
(データ量の圧縮 → 高速化)

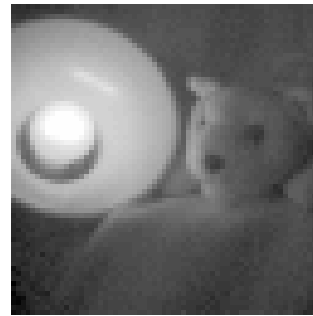


重心
= (43.4, 14.6)

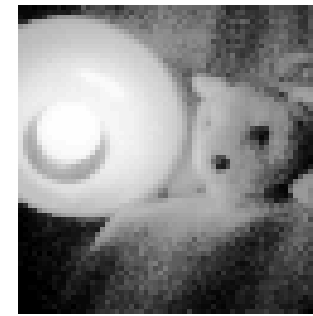
ビジョンチップのセンサ特性制御



比例スケール

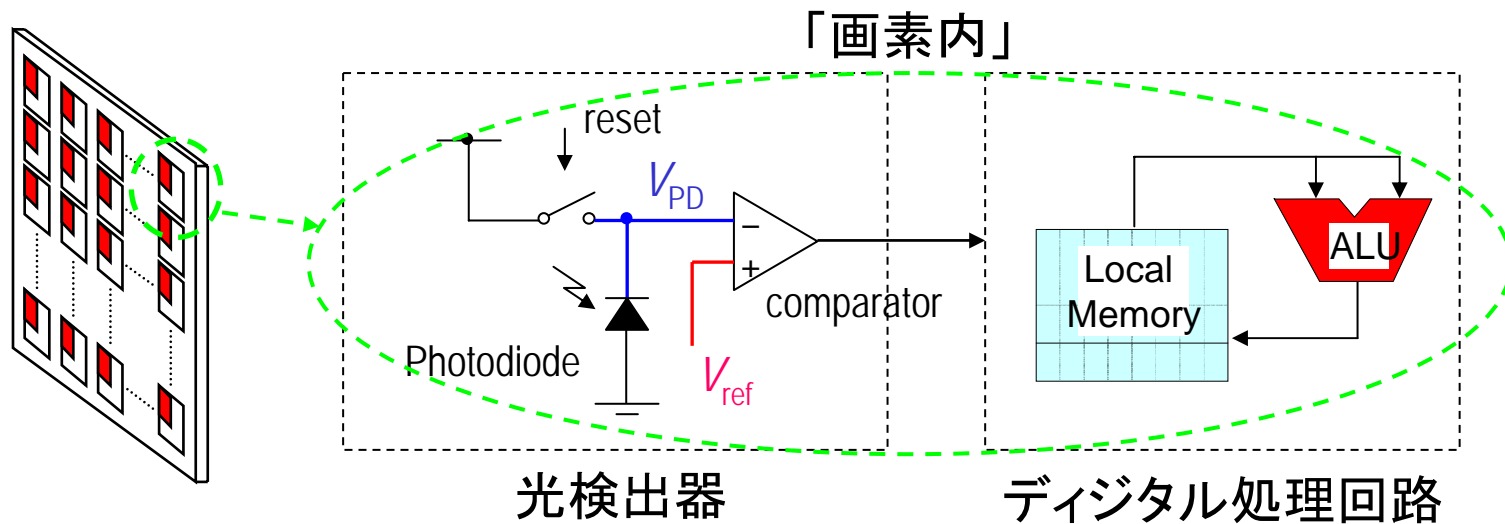


対数スケール



ヒストグラム均等化

「撮像の過程」を「ソフトウェアで」柔軟に制御できる
→ 広いダイナミックレンジ, 画質最適化



対象追跡チップ



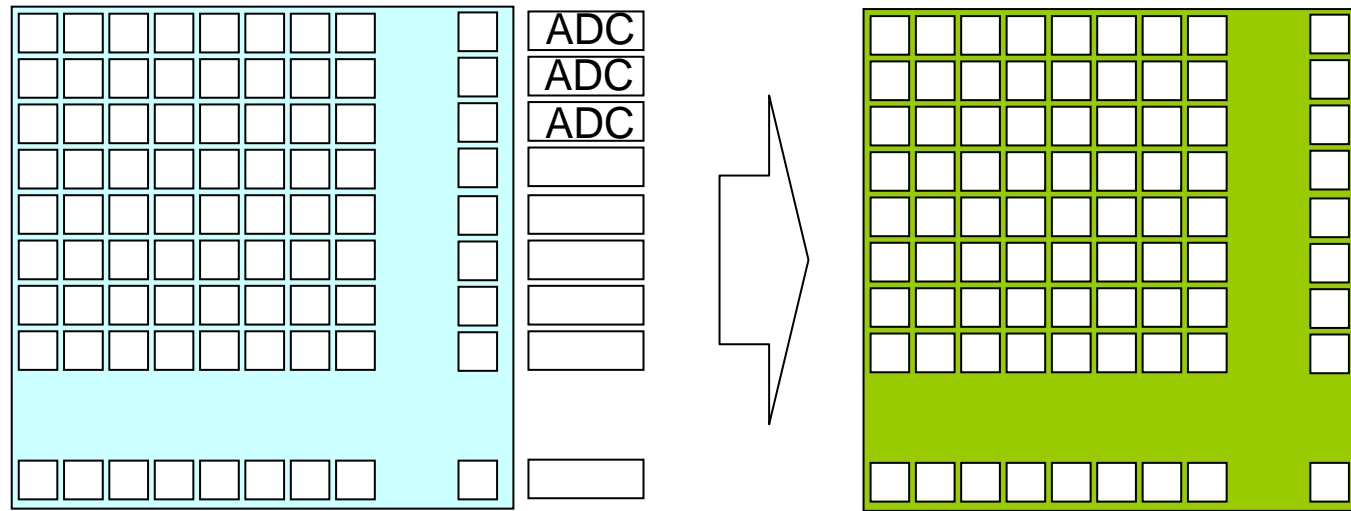
- ・ カラーアプリケーションである対象追跡に機能限定 → 小型化・低コスト化
- ・ 1/6型, 32×48 (1,536)画素
- ・ 外形寸法: 13.4 (幅) \times 14.3 (高さ) \times 7.4 (奥行き) mm
- ・ USB 評価キット



日本プレジジョン・サーキット(株)と共同開発

[小室2004]

高速画像転送によるアプローチ

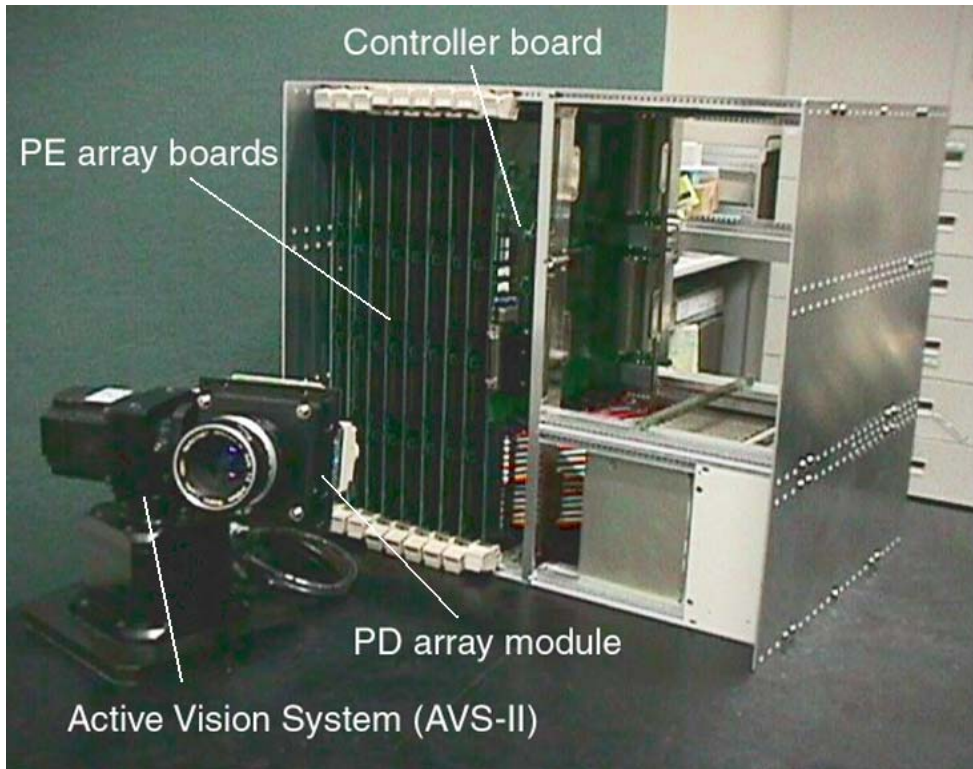


光検出素子アレイ 列並列A-D変換器

処理回路アレイ

- 光検出素子の出力を列並列A-D変換
- デジタル信号を高速に画素並列プロセッサに転送
- 処理部は, (基本的に)ビジョンチップと同一の構造

CPV-I システム

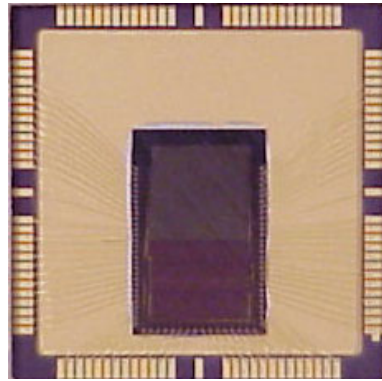


- 128×128 画素
- XILINX XC4044XL 128個で
並列処理アレイを構成
(ボード8枚)

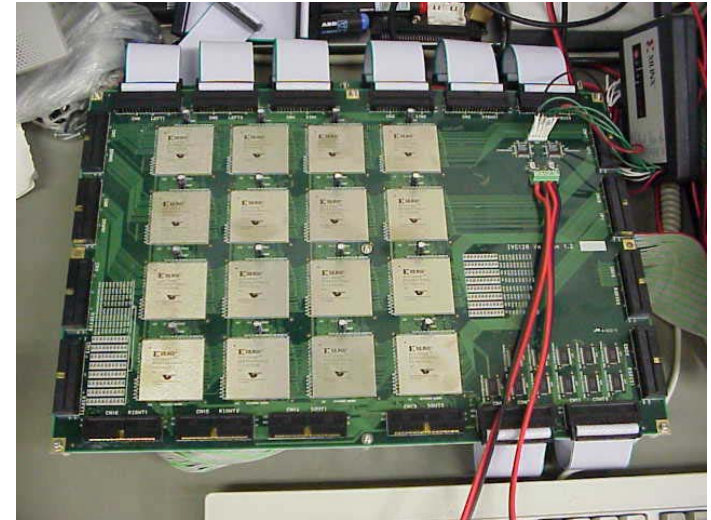
浜松ホトニクス(株) との共同研究

[中坊1999]

CPV-II システム



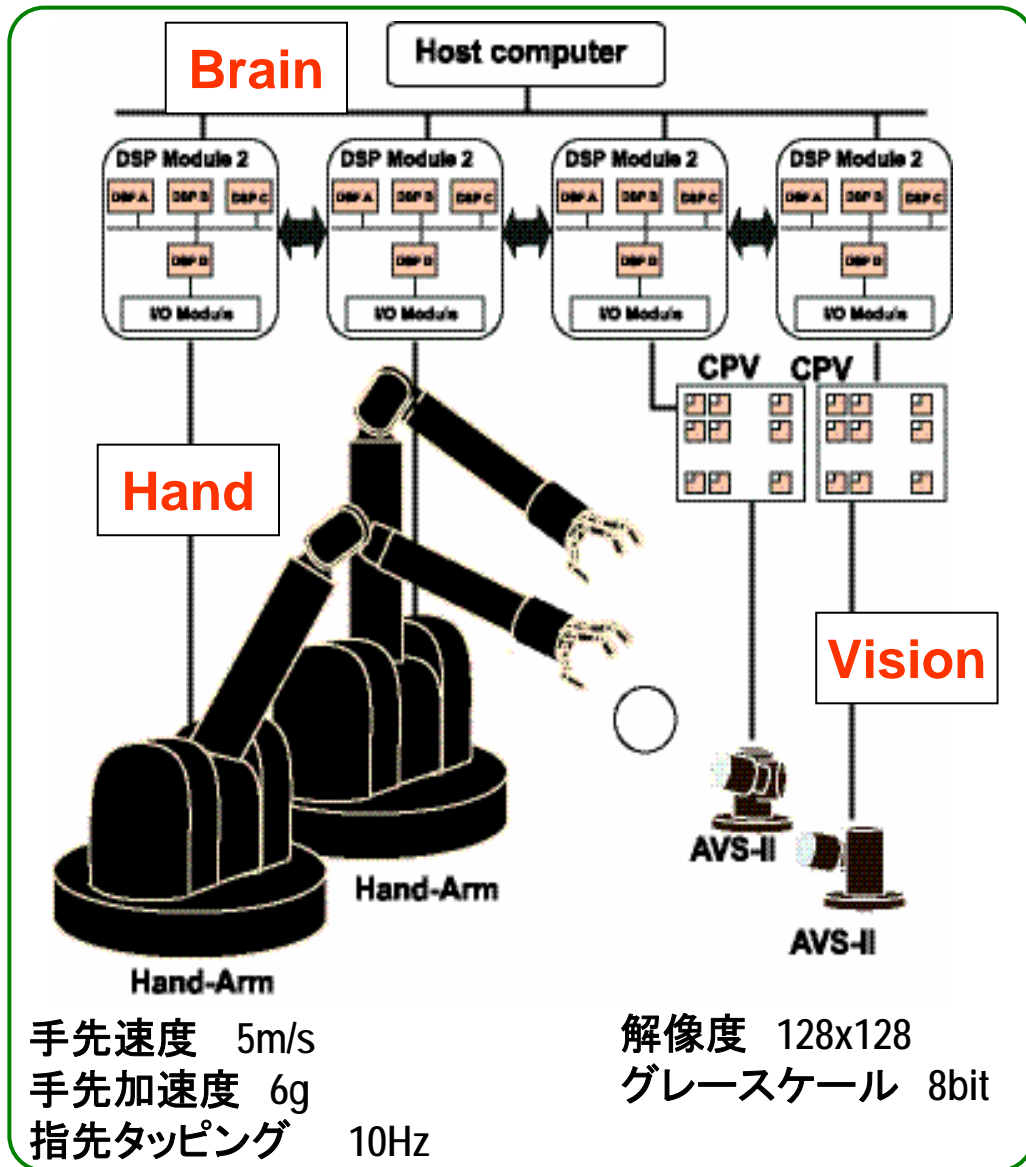
光検出素子
+ADC



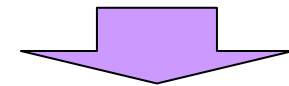
- 128 × 128画素
- XILINX XCV1000E 16個で
並列処理部を構成

浜松ホトニクス(株)との共同研究
[豊田2001]

1ms感覚運動統合システム



- 階層並列制御システム (DSP)
- 高速アーム＋高速多指ハンド
- 双眼高速アクティブビジョン＋CPVシステム



1ms センサフィードバック
(視覚、力覚、内界センサ)

[並木2001]

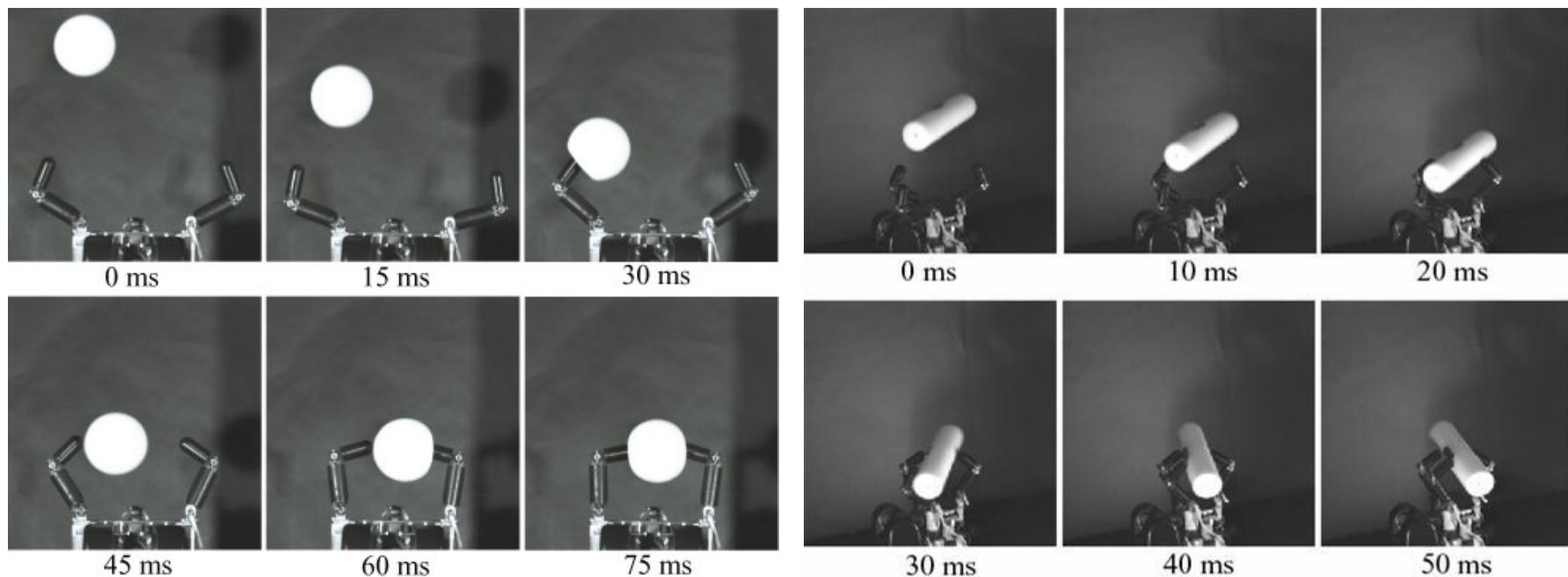
高速ロボットアームによる把握動作



- 2台の高速ビジョンで対象の3次元位置を追跡
- 素早く不規則な動きにも追従し，把握可能

[並木2001]

高速ハンドによる捕球動作

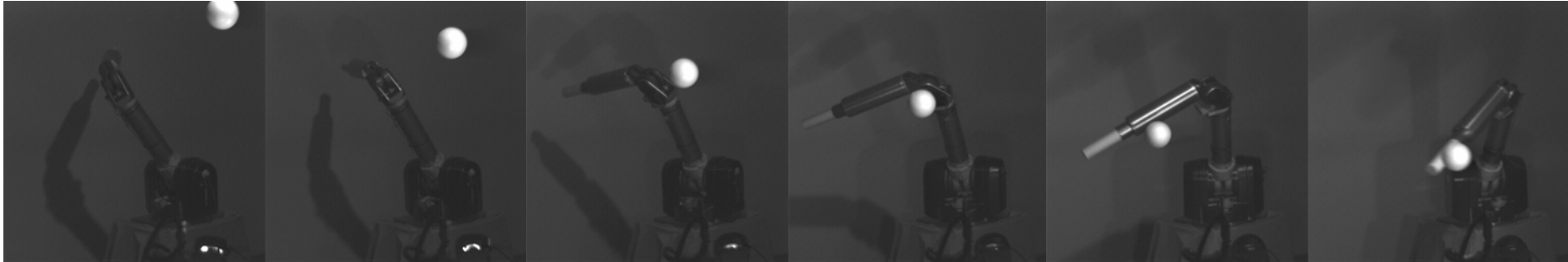


(株)ハーモニック・ドライブ・システムズの協力を得て高速ハンドを開発

落下する物体を指先でキャッチング
(つかみやすい姿勢にする能動的操作が実現できている)

[今井2004]

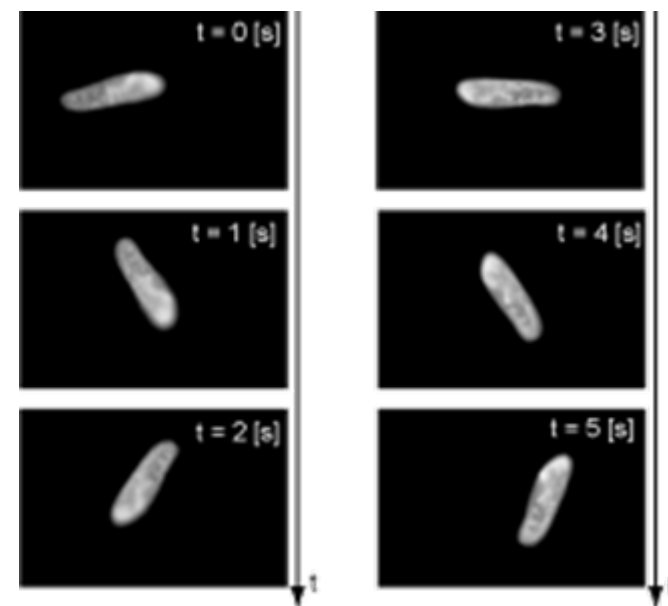
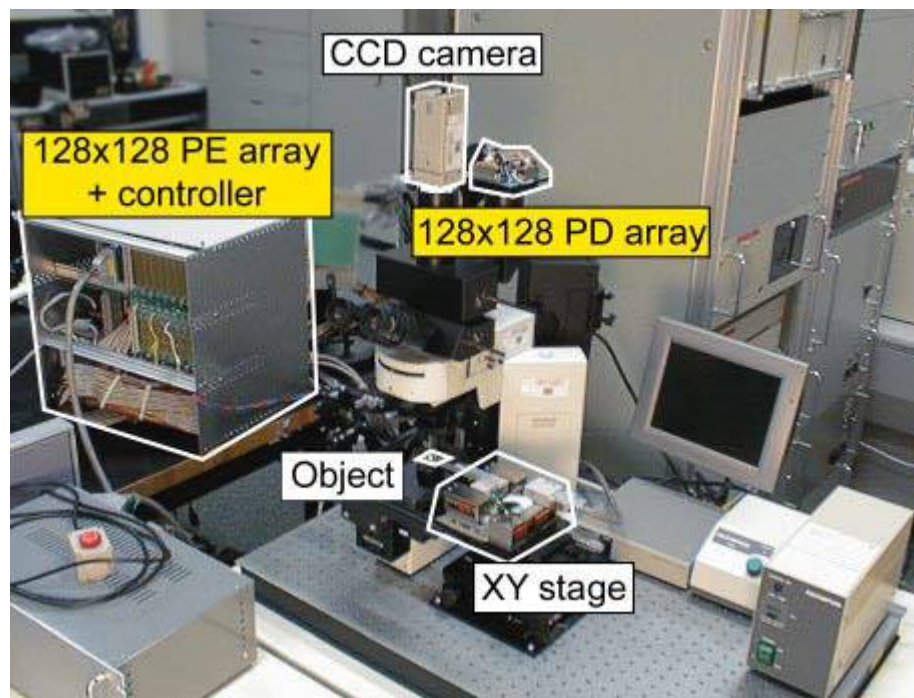
ロボットアームによるバッティング動作



- バットを高速に振り切る動作と、ボールの動きに追従する動作を両立して、バットの芯で打撃
- 2.5m 離れたところから、5~8m/s のボールを投球
- 成功率 90% 程度

[妹尾2005]

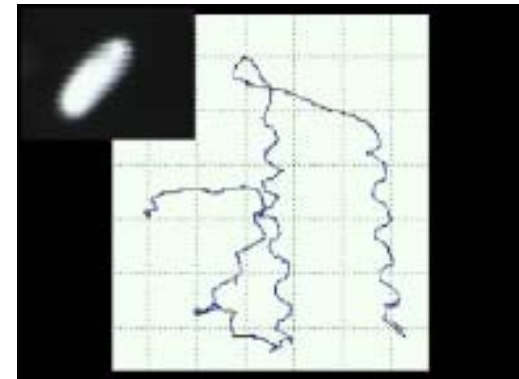
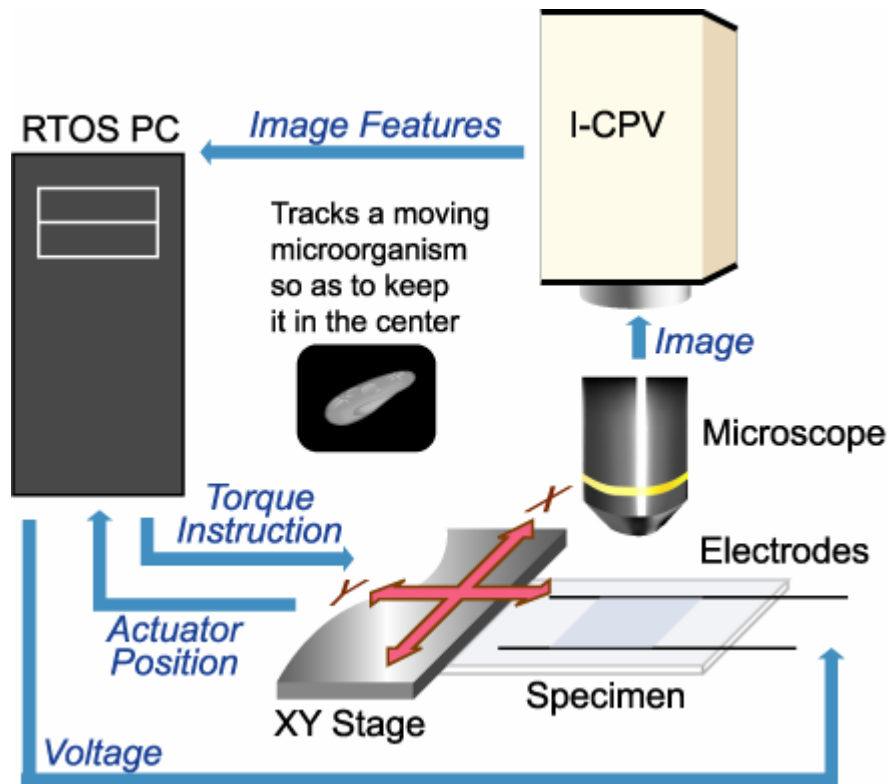
顕微鏡システムへの応用



- 顕微鏡下の観察対象がつねに視界の中央に来るように XY ステージを制御
- バイオテクノロジー, マイクロマシンへの応用

[奥2001]

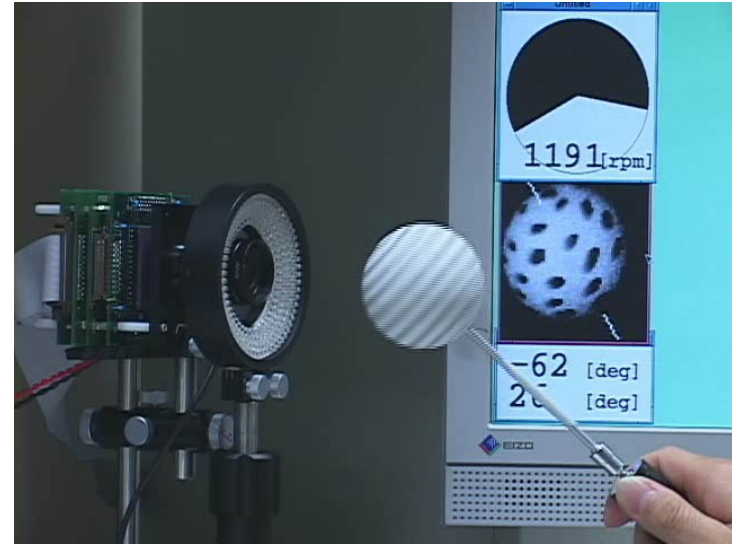
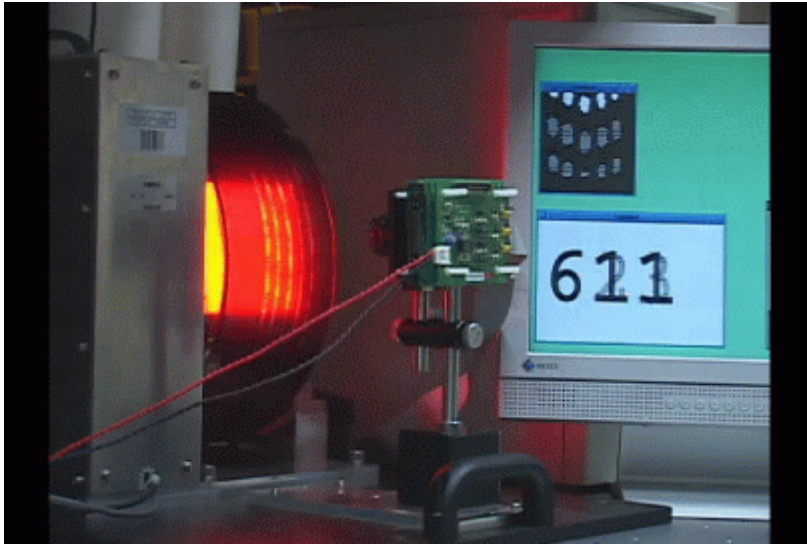
微生物の観察・制御



- 微生物(ゾウリムシ)の動きを追跡
- 電場を生成することで、その動きを制御

[尾川2003]

高速計測・検査応用



多数の対象の同時追跡処理をベースとした計測応用

- 対象計数システム
- 回転計測システム

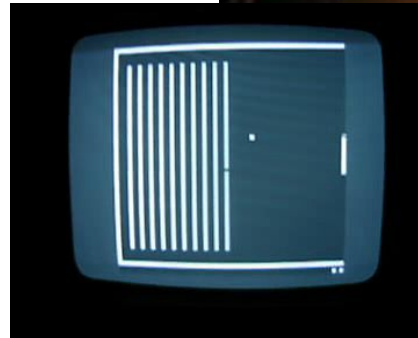
[渡辺2003]

アミューズメント応用



(株)セイコープレジジョンによるデモ
高校生クイズに登場 → 高校生誰も勝てず

ヒューマンインタフェースへの応用



コンピュータ機器やゲーム機器へのジェスチャ入力・認証システムへの応用などが期待できる

[Ebert 2004]

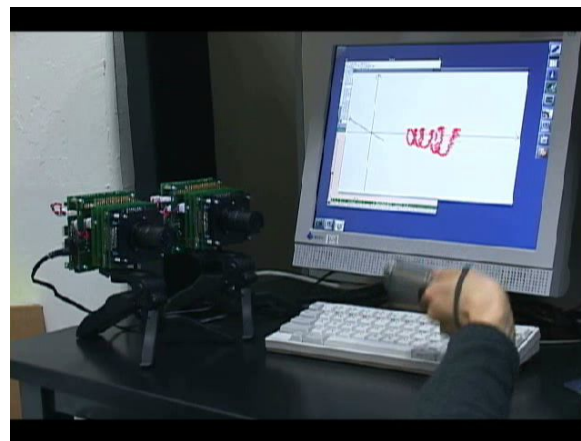
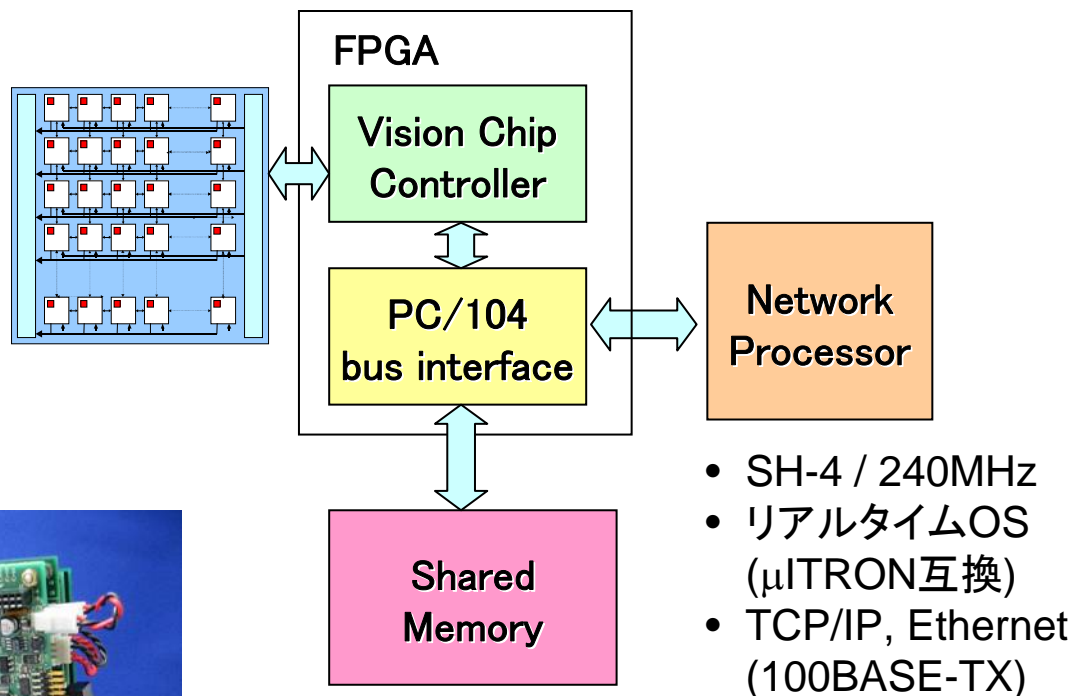
高速ビジョンネットワークへの展開



RJ-45
ジャック

[齊藤2005]

鏡 慎吾 (東北大学): 知能制御システム学 2007.04.10



リアルタイムとは？

広義には、

ある処理の正当性が、その論理的な計算結果だけではなく、計算のなされた時間にも依存すること

狭義には、

ある処理の完了に対してデッドラインが定められていること

さまざまなリアルタイム性の例

軌道計画
~ 1[s]

ダイナミクスモデル計算
~100 [ms]

モータ制御 ~1[ms]



レーザ飛行時間距離計測
~100[ps]

音声波形生成
~20 [μs]

力覚センサ処理
~1 [ms]

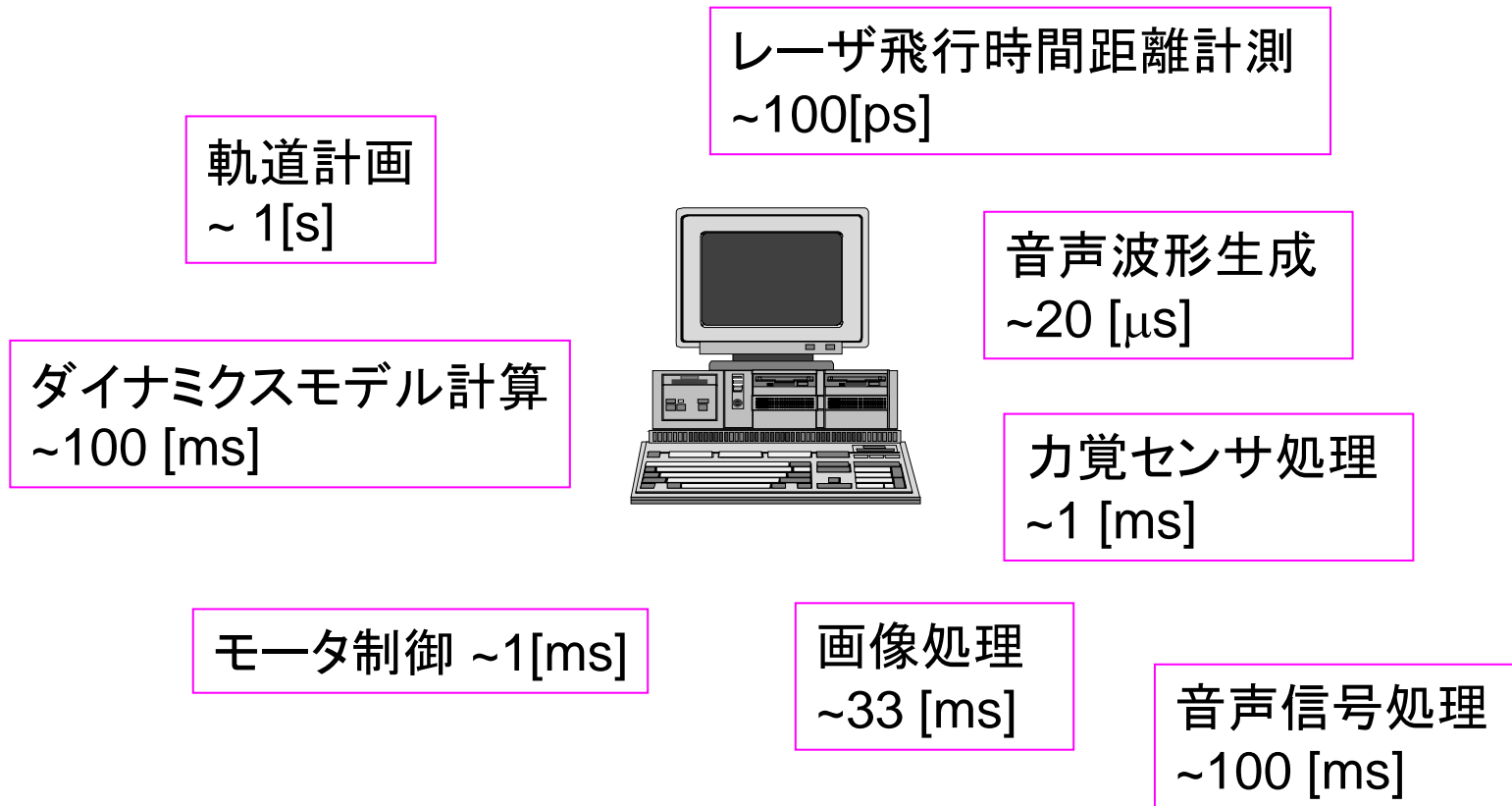
画像処理
~33 [ms]

音声信号処理
~100 [ms]

リアルタイム ≠ 高速

何を以ってリアルタイムとするかはそのシステムがインタラクトする物理現象で決まる

リアルタイム計算システム



いろいろな処理を, それぞれの時間制約を満たしながら実行したい. どのように処理の順番を決めればよいか?

References

- [Photron] <http://www.photron.co.jp/products/image/hsvcam/admission/sample.html>
- [中坊1999] 中坊嘉宏, 石井抱, 石川正俊, 豊田晴義, 水野誠一郎: 列並列S3PEアーキテクチャによる超高速ビジョンシステム (CPV-I), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 (東京, 1999.6.13) / 講演論文集, 1P1-65-096
- [石井1999] 石井抱, 石川正俊: 1msビジュアルフィードバックシステムのための高速対象追跡アルゴリズム, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2, pp.195-201 (1999)
- [小室2003] 小室孝, 鏡慎吾, 石川正俊: ビジョンチップのための動的再構成可能な SIMD プロセッサ, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.11, pp.1575-1585 (2003)
- [鏡2005] 鏡慎吾, 小室孝, 渡辺義浩, 石川正俊: ビジョンチップを用いた実時間視覚処理システム VCS-IV, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J88-D-I, No.2, pp.134-142 (2005)
- [小室2004] 小室孝, 石川正俊, 石井抱, 吉田淳, 稲田喜昭, 小宮泰宏: 高速対象追跡ビジョンチップの開発, 計測と制御, Vol.43, pp.802-804 (2004)
- [豊田2001] 豊田晴義, 向坂直久, 田中博, 宅見宗則, 水野誠一郎, 中坊嘉宏, 石川正俊: 超高速インテリジェントビジョンシステム: CPV-II—センサ部および並列演算部の小型集積化—, 第19回日本ロボット学会学術講演会 (東京, 2001.9.18) / 予稿集, pp.383-384
- [並木2001] 並木明夫, 中坊嘉宏, 石川正俊: 高速視覚を用いたダイナミックマニピュレーションシステム, 第19回日本ロボット学会学術講演会 (東京, 2001.9.19) / 予稿集, pp.389-390
- [今井2004] 今井睦朗, 並木明夫, 橋本浩一, 石川正俊, 金子真, 亀田博, 小山順二: 高速多指ハンドと高速視覚によるダイナミックキャッチング, 第9回ロボティクスシンポジア(那覇, 2004.3.9) / pp.517-522
- [妹尾2005] 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: 高速ロボットシステムによるバッティングタスクの実現, 第10回ロボティクスシンポジア(箱根, 2005.3.14) / 予稿集, pp.75-80
- [奥2001] 奥寛雅, 石井抱, 石川正俊: マイクロビジュアルフィードバックシステム, 電子情報通信学会誌 D-II, Vol. J84-D-II, No.6, pp.994-1002 (2001)
- [尾川2003] 尾川順子, 奥寛雅, 橋本浩一, 石川正俊: 微生物の電気走性の継続観察システム, 第4回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2003), (東京, 2003.12.20) / pp.385-386
- [渡辺2003] 渡辺義浩, 小室孝, 鏡慎吾, 石川正俊: ビジョンチップのためのマルチターゲットトラッキングとその応用, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II No.10, pp.1411-1419 (2003)
- [Ebert2004] Dirk Ebert, Takashi Komuro, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa: Safe Human-Robot-Coexistence: Emergency Stop Using a High-speed Vision Chip, The 22nd Annual Conference of the Robotics Society of Japan (Gifu, 2004.9.16) / Proceedings, 2E11
- [齊藤2005] 齊藤翔一郎, 鏡慎吾, 小室孝, 石川正俊: ネットワーク接続機能を実装した高速ビジョンチップシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005, 2A1-N-096, 2005.