戦略的創造研究推進事業（CREST）

研究領域：ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術

研究課題名：自己修復機能を有する3次元VLSIシステムの創製

研究代表者：　東北大学工学研究科バイオロボティクス専攻

小柳　光正

研究実施体制（研究チームの構成）

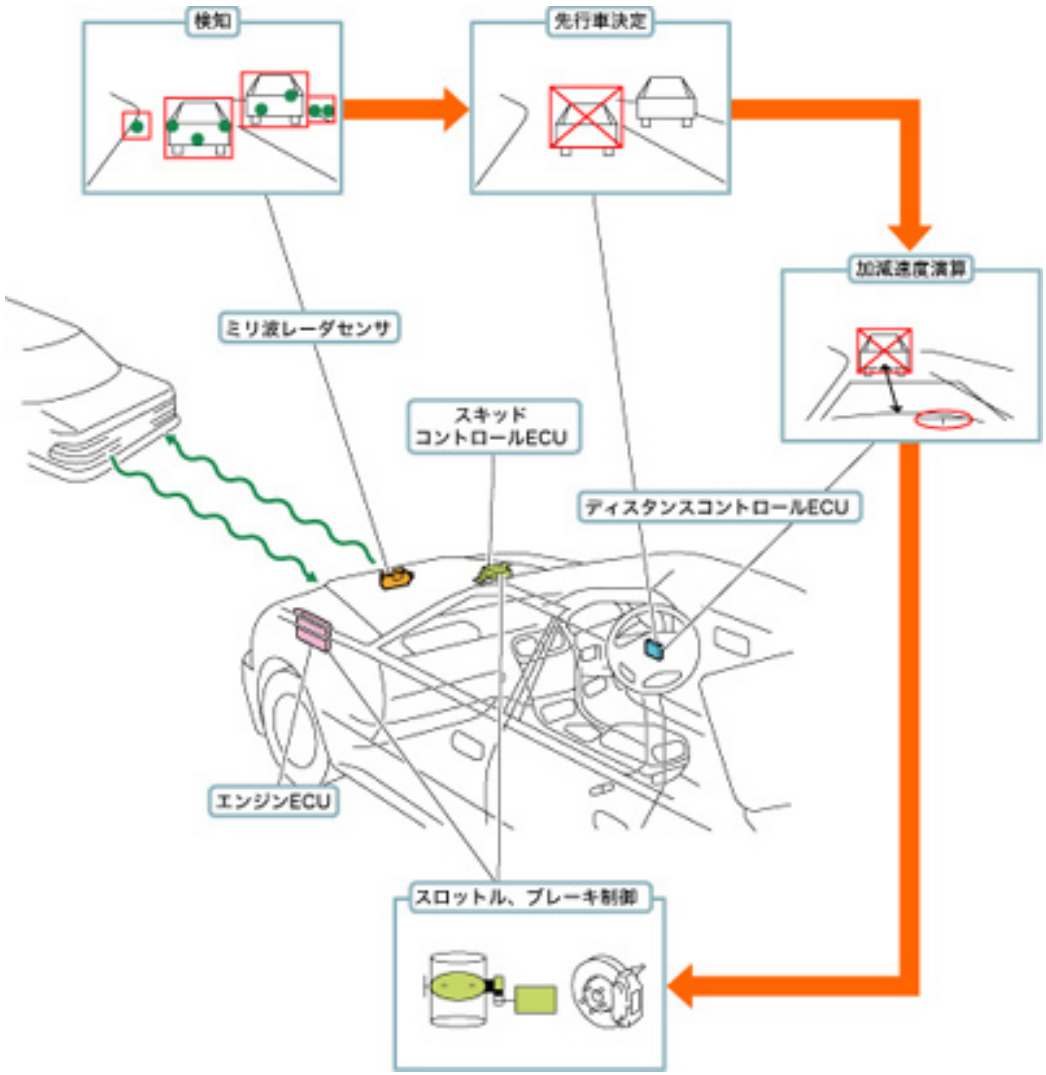
グループ名	研究代表者又は主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目）
小柳グループ	小柳　光正	東北大学・大学院工学研究科・教授	自己修復機能を有する3次元VLSIシステムの全体設計および性能評価
小林グループ	小林　広明	東北大学・サイバーサイエンスセンター・教授	ハードウェア・ソフトウェア協調型ディペンダブルシステムの開発および性能評価
青木グループ	青木　孝文	東北大学・大学院情報科学研究科・教授	車載用超高精度ステレオビジョンシステムの開発および性能分析
末吉グループ	末吉　敏則	熊本大学・大学院自然科学研究科・教授	3次元リコンフィギャラブルロジックの設計および性能評価
鎌田グループ	鎌田　忠	(株)デンソー・ITS技術3部開発室兼半導体先行開発室・主幹	車載用画像処理システムの概念設計と高頼化技術の検討
元吉グループ	元吉　真	(株)ザイキューブ・取締役社長	自己修復機能を有する3次元LSIテスト回路の試作および評価

本提案で取り上げるアプリケーション

高度化する自動車の運転補助を可能とする画像制御システム

これまでのレーダやセンサを用いた車間制御クルーズシステム、プリクラッシュセーフティシステム、レーンキーピングアシストシステムと高速画像処理・認識機能を複合的に組み合わせた新しい画像制御システムのための基幹技術を開発

高いデペンダビリティが必要



自動車システム全体のディペンダビリティ向上

(1)悪環境条件下でのディペンダビリティの向上

・センサー入力系の多重化によるロバスト性の高い画像認識
・センサー入力系、認識系、表示系を介した人間介在による判断

(2)自動車全体におけるディペンダビリティの向上

・センサー入力系／認識系インターフェイスおよび認識系／制御系インターフェイスの高信頼化
・制御系からセンサー入力系／認識系へのフィードバック機構の導入
・制御系からセンサー入力系／認識系へのフィードバック機構の人間による制御

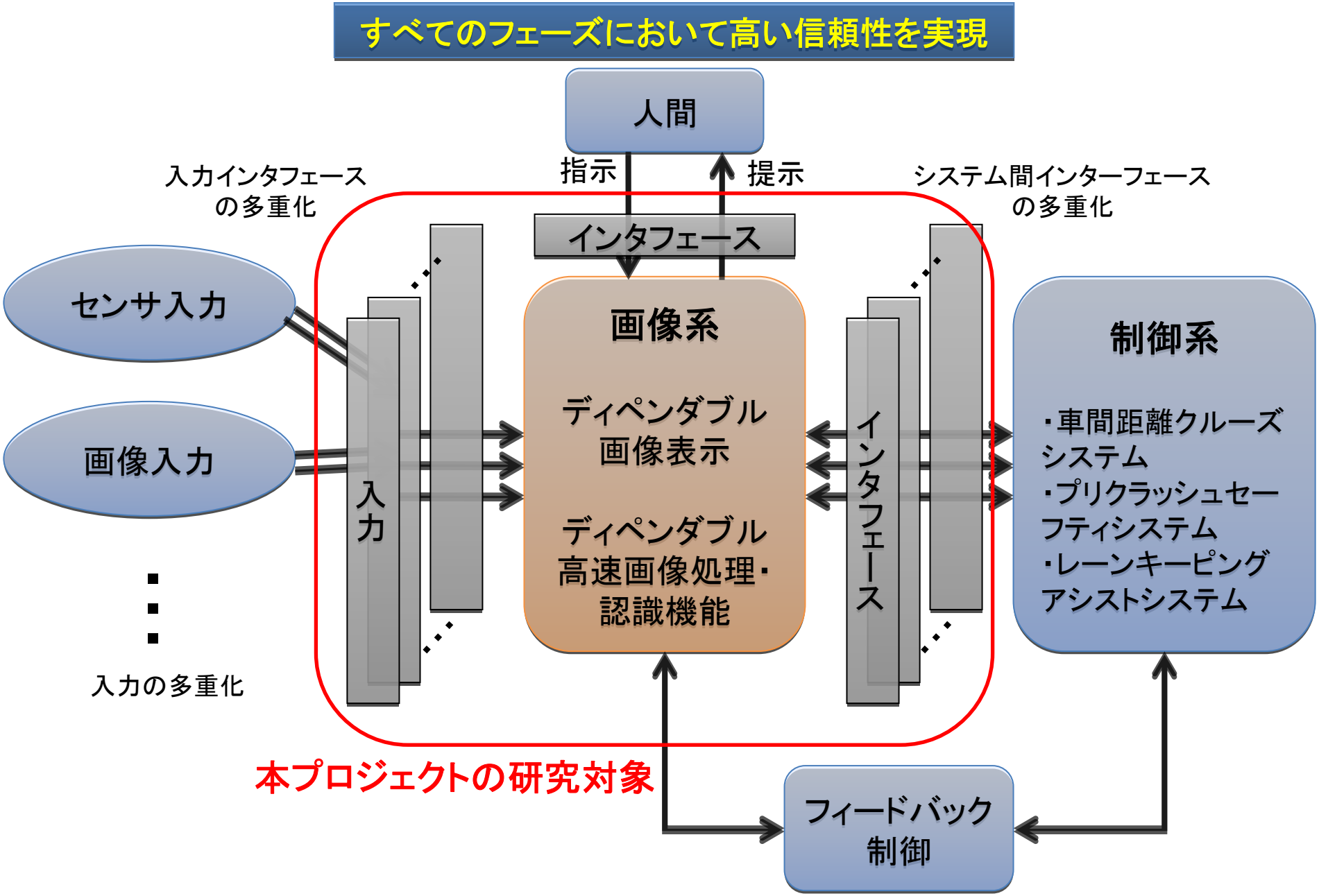
(3)画像系のディペンダビリティの向上

・画像処理、画像認識のディペンダビリティ向上
・ソフトウェアのディペンダビリティ向上
・ハードウェアのディペンダビリティ向上

(4)制御系のディペンダビリティの向上

（既に高い信頼性が確立されているので、本研究プロジェクトでは対象外）

本プロジェクトで対象とする研究領域



本プロジェクトで目指すディペンダビリティの向上

センサー入力系インターフェイスのディペンダビリティ向上

・センサーの多重化・多様化によるロバスト化、マルチモーダル化とインターフェイスの多重化

画像系のディペンダビリティの向上

・画像処理、画像認識のディペンダビリティの向上

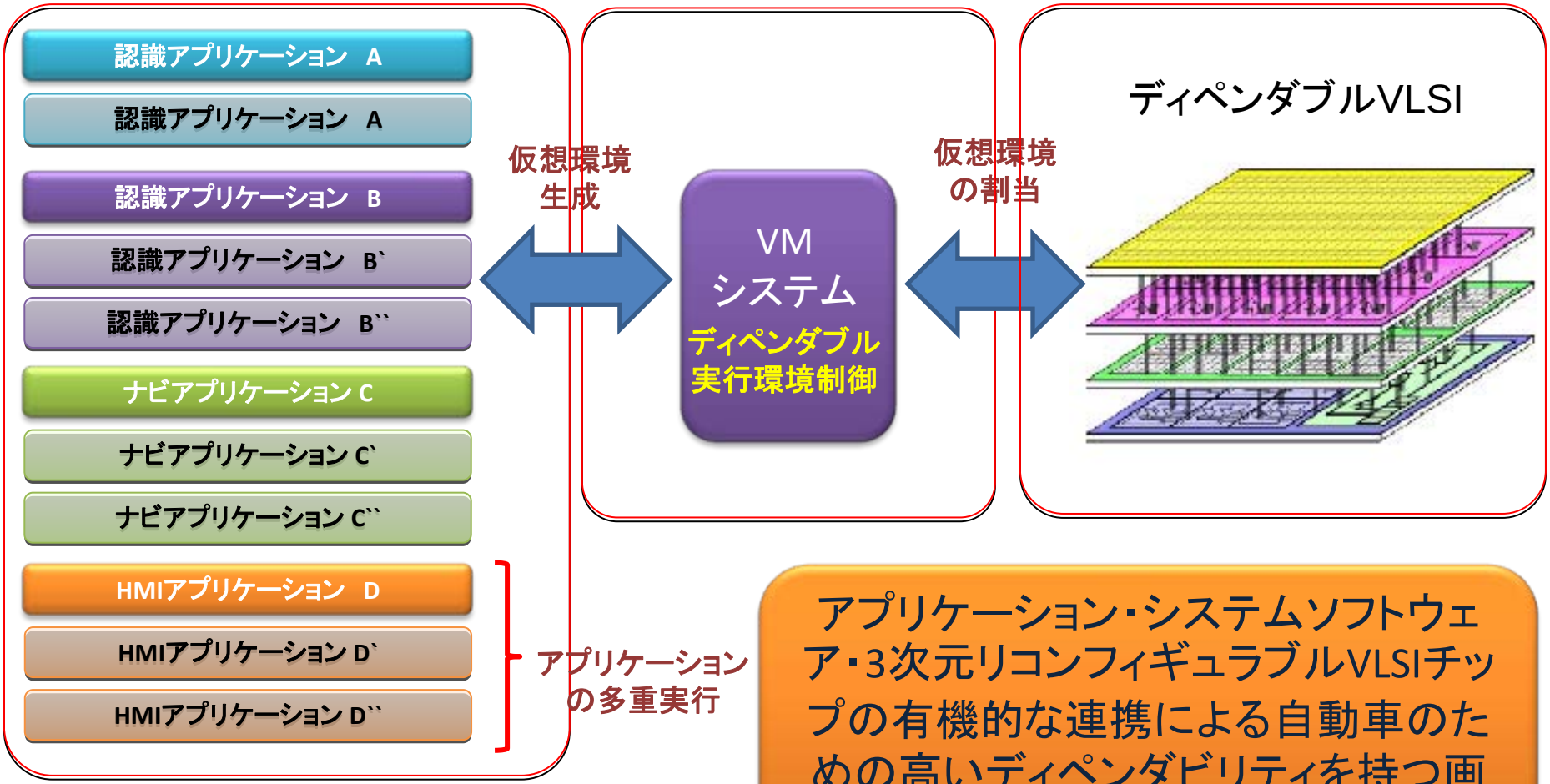
画像の高精細化と処理の高速化

・ソフトウェア／ハードウェアのディペンダビリティ向上

信頼性と性能のトレードオフの中で、ハードウェア、CPU、ソフトウェアをベースとした信頼性向上手法を採用してシステム全体のディペンダビリティを向上

研究分担と各グループの役割

画像認識システム	システムソフトウェア	3次元リコンフギュアブルVLSIチップ
鎌田グループ　青木グループ	小林グループ	小柳・末吉・元吉グループ



アプリケーション・システムソフトウェア・3次元リコンフィギュラブルVLSIチップの有機的な連携による自動車のための高いディペンダビリティを持つ画像・制御システムの実現

位相限定相関法（POC）

ピクセル分解能の壁を超える超高精度画像マッチング技術（東北大学　青木グループ）

平行移動量の高精度検出

誤差 < 1/100ピクセル　（100x100画像のとき）

回転角度の高精度検出

誤差~ 1/100度　（250x250画像のとき）

拡大・縮小率の高精度検出

誤差~ 1/10000 = 0.01%　（250x250画像のとき）

サブピクセル対応点探索

誤差~ 1/20ピクセル　（11x11画像のとき）

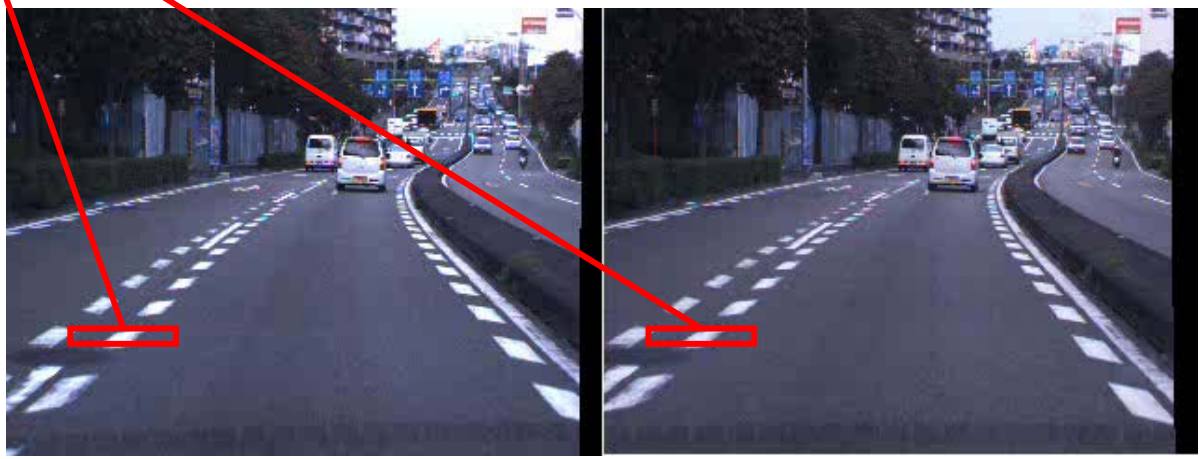
画像照合の類似度の尺度として優れている

マッチングのロバスト性に優れ、画像を選ばない,

自動車の視覚システムの開発
ドライバー・アシスト技術

短基線長コンパクト
ステレオカメラ
モジュール

位相限定相関法による高精度対応点探索



左カメラ画像　　右カメラ画像

高レベル安全性を達成するための次世代車載用超高精度ステレオビジョン

車両前方50m地点での計測精度

- X軸（水平）・Y軸（垂直）空間分解能 ≦ 5cm
- Z軸（奥行）空間分解能 ≦ 50cm
- X軸（水平）・Y軸（垂直）速度分解能 ≦ 10km/h

これを実現するためのシステム仕様

- 画像サイズ = SXGA（1280x1024画素）, 60fps
- 基線長 = 20cm, 焦点距離 = 6.5mm
- ステレオ画像対応付け精度 = 0.05画素
- ステレオ画像対応付け点数 = 40万点
- 高信頼化のための冗長度 = 2重化冗長

車載用画像処理・認識システムの概念設計

現状のシステム

- 2重化されたVGA（640×480dots）カメラシステムを搭載
  （1セット～最大6セット：前後左右運転手車室内）
- 60fpsの表示システムを搭載
- 人間がストレスを感じないレスポンス（＜0.2秒）で反応するシステム

処理能力要件

・Nバーションプログラムの考え方でソフトウェアの設計エラーを回避
（最低でも3種類のプログラムが 所定時間内に同時に走る能力が必要）
・それぞれのプログラムは走るプログラミングモデル(CPU/OS/IO)が異なる
場合が通例なのでVMなどで仮想化してこれらの差異を埋めることが必要
・要求性能としては最大6系統の画像認識処理とHMI表示処理が走る必要があり
・アルゴリズムにもよるが、一般的に1000～5000MIPSの処理をVM上でこなす事
が要求される
・VMの効率を約10%と仮定すると、非エラー時で最大50GIPS程度の能力が必要

環境要件

・一般的な産業用の組み込みシステムの環境要件（-40～85℃）での動作が要求される
・自動車応用を考えると消費電力が5W以上のデバイスは扱いにくい
・エラー回避時に大きな電力を使うことは、正帰還がかかり危険
・最大でも消費電力は5W以下、電力性能は0.1mW/MIPS
・冷却システムが故障停止した場合に備えて、低電力で最低限の動作をするモードが
必要（この場合の電力は1W以下）

耐久性要件

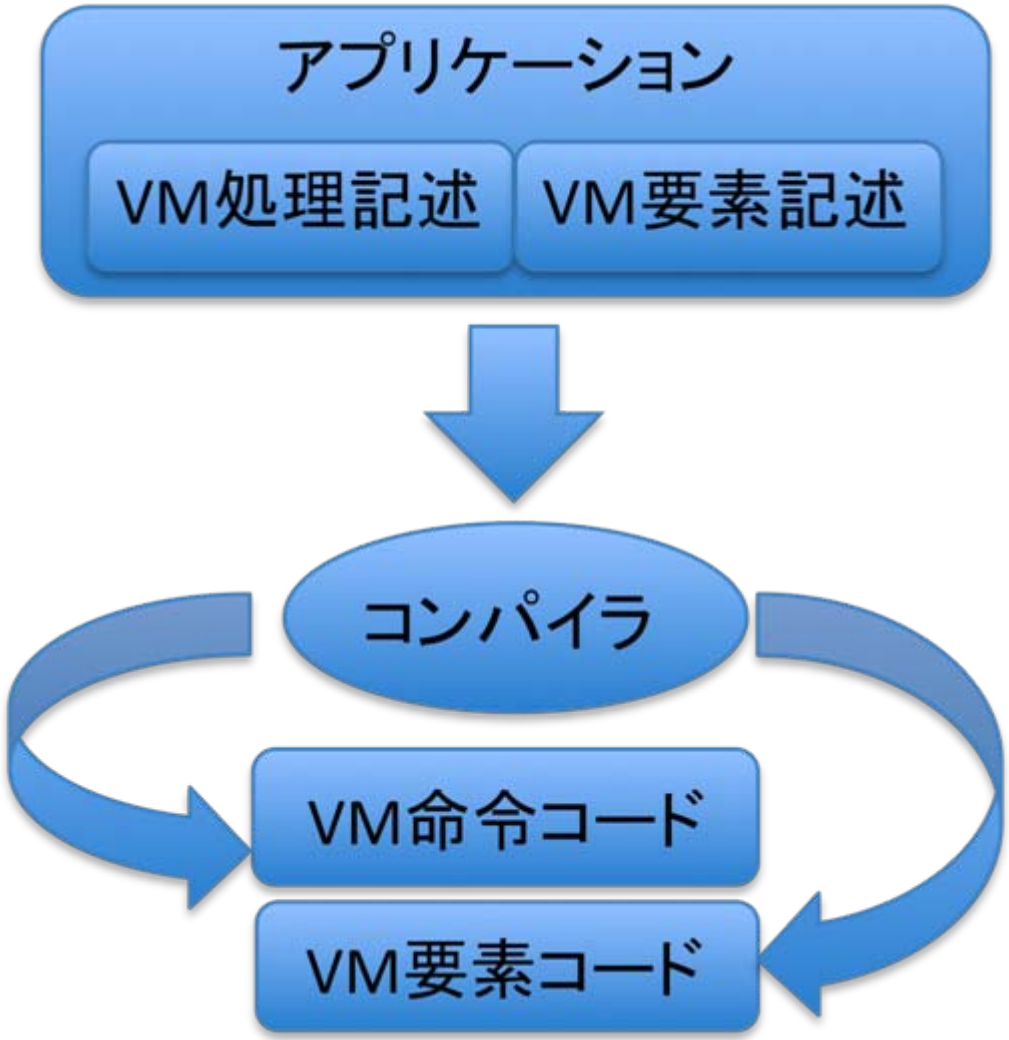
・10年間無故障（水準1,水準2での回復）で動作すること
・フェールスモール動作として故障の表示とカメラ画像の直接表示が望まれる

ディペンダビリティを高める基本機能

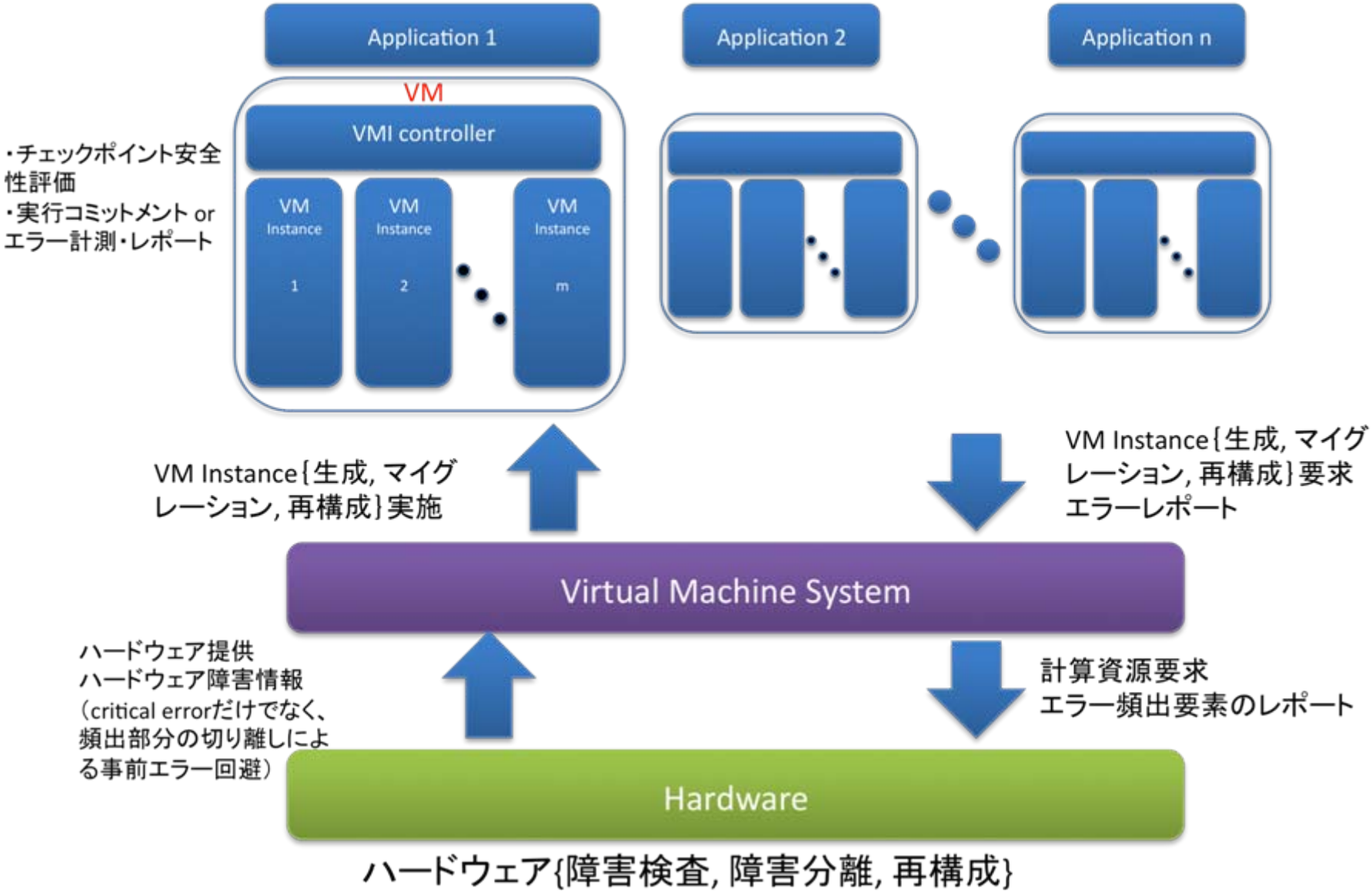
- ソフトウェア
  - システム監視によるエラー・不正検出（モデル）
    - 多重・冗長実行
  - エラーリカバリ・ノンストップシステム制御
    - 多数決処理
    - ハードウェア再構成制御
  - 仮想化技術
    - 実行環境とハードウェア資源の分離

- ハードウェア
  - 冗長・代替ハードウェア
  - ハードウェア再構成機能
  - ハードウェアモニタ・エラーログ機構
  - メモリの共有化／多重化と再構成メモリ

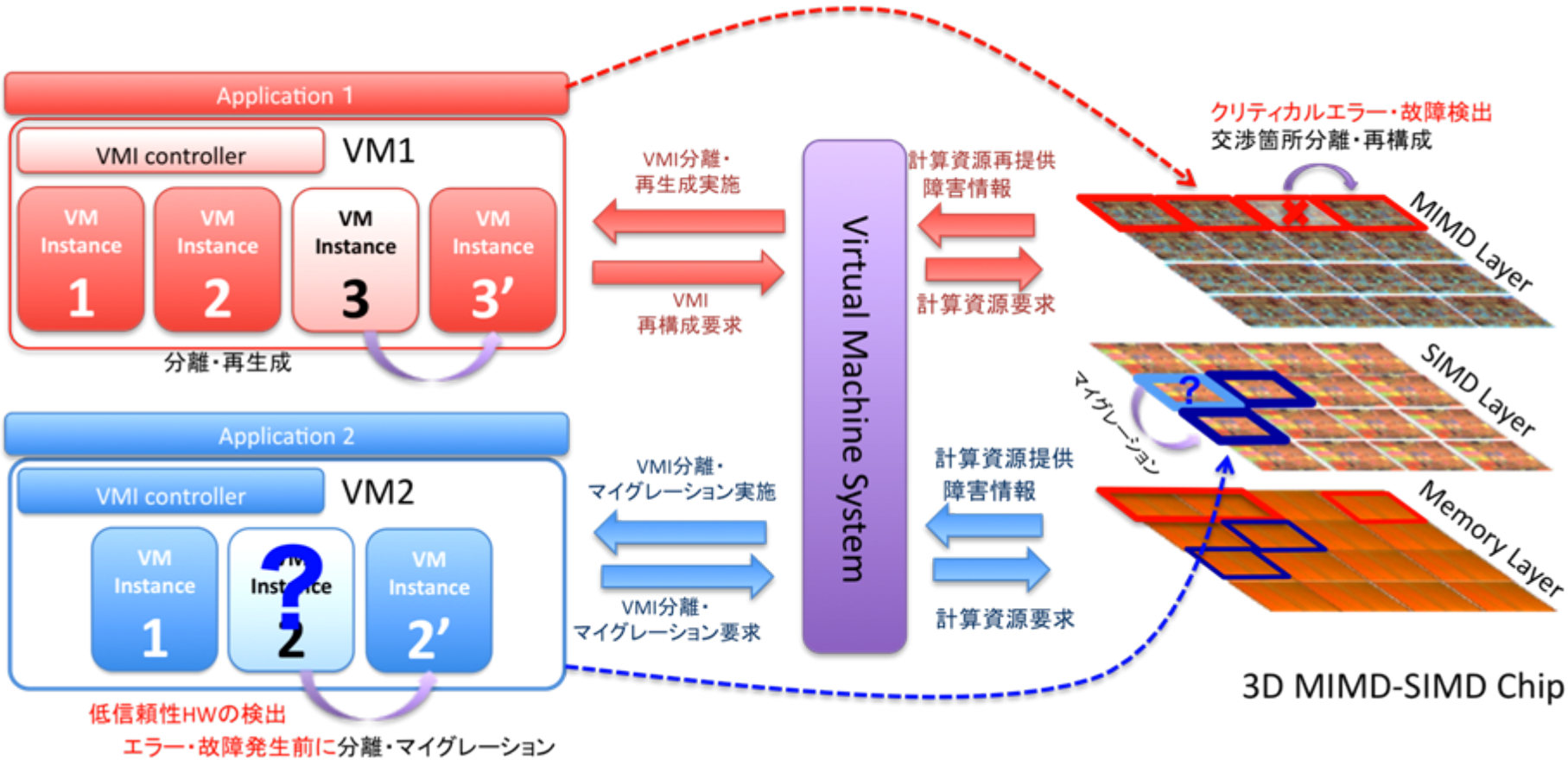
テーラーメイド計算環境の実現



ディペンダブルVMシステムアーキテクチャ



VM instanceの分離・再生成・マイグレーション



ディペンダブルVMシステム

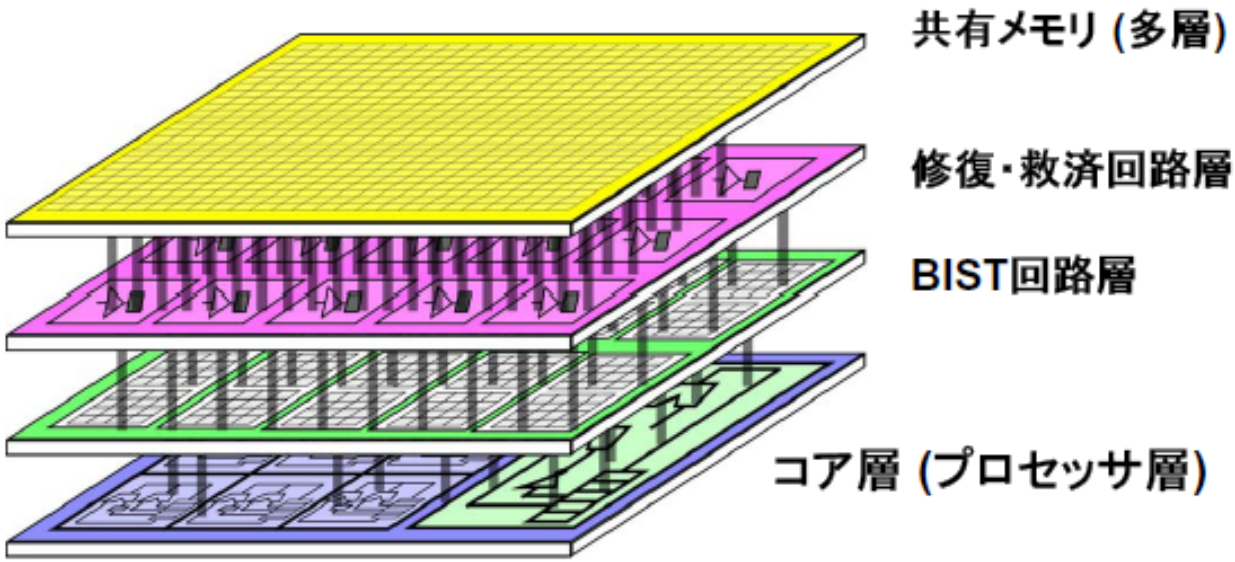
達成目標

- ほとんどの安全時、すなわちcommon caseである通常処理を遅らせることなく安全・安心なプログラム実行
  - ただし、インシデント発生時はペナルティが生じるがミニマムに！

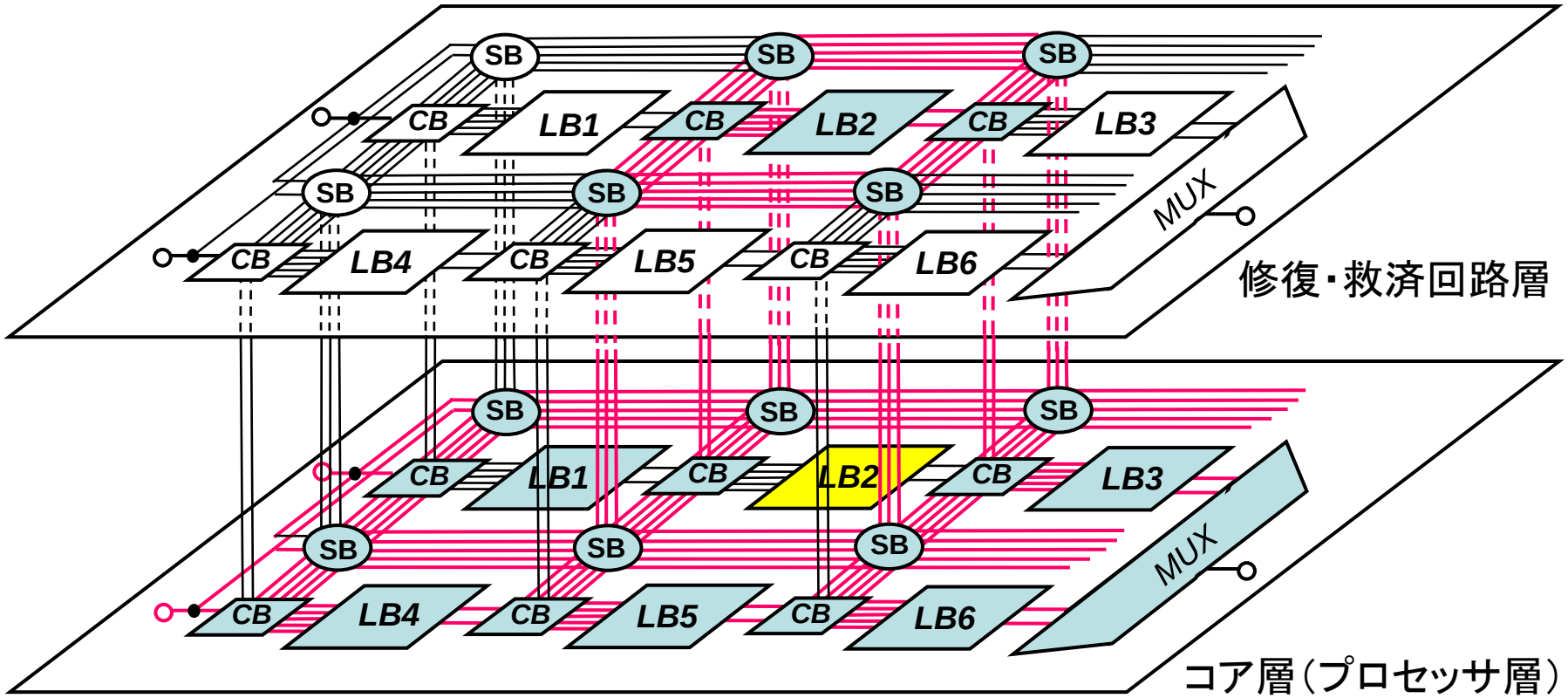
研究開発課題

- 冗長・多重実行による　エラー検出、エラーリカバリ、ノンストップ実行
- 計算コア・メモリの仮想化（実行環境とハードウェアリソースの分離）
- エラーロギングによる障害予測（事前エラー回避）
- 障害からのリカバリは、
  - エラー同定
  - クリーンな仮想環境へ実行環境マイグレーション（ノンストップ実行）
  - ハードウェアの再構成（graceful reduction）

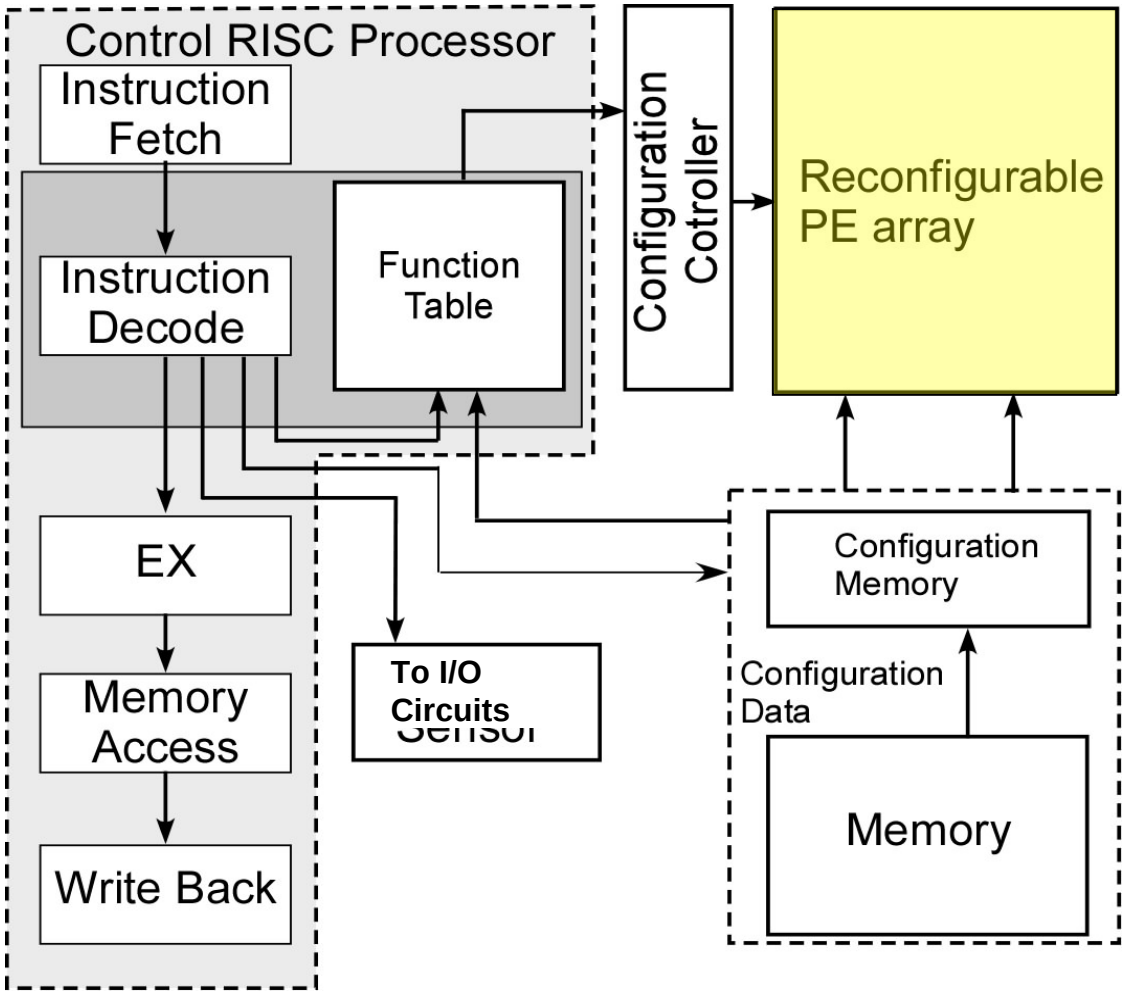
自己修復機能を有する3次元VLSIの構成（概念図）



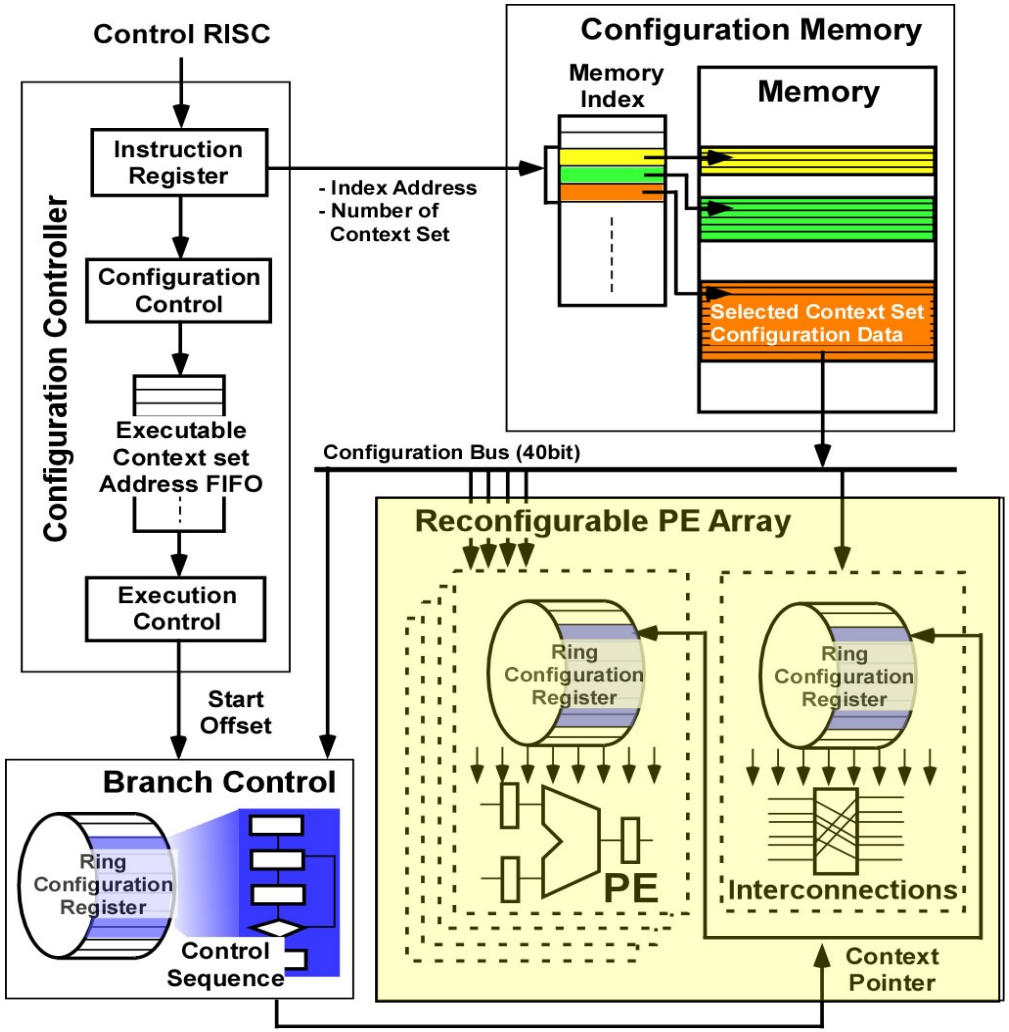
リコンフィギュラブル回路による修復・救済（細粒度）



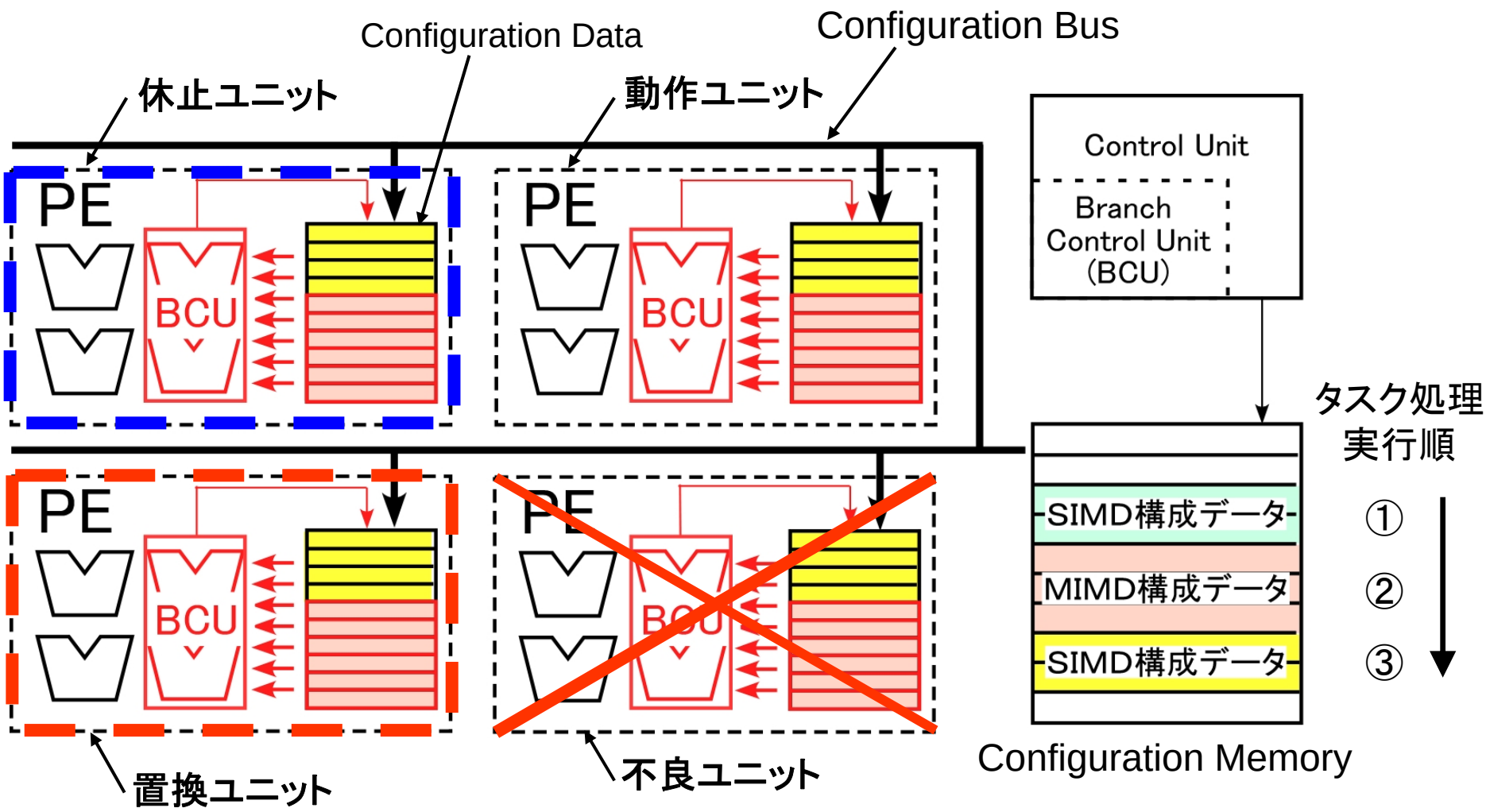
リコンフィギュラブルプロセッサの構成（粗粒度）



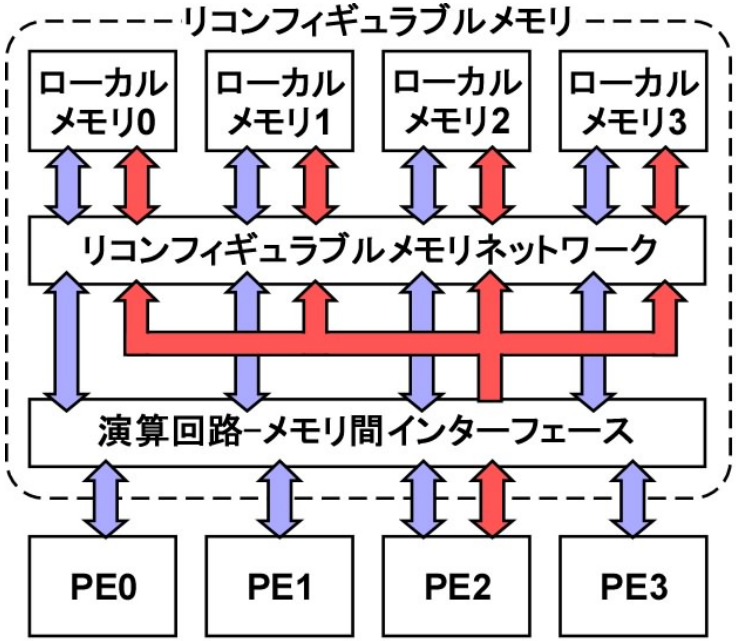
階層型再構成アーキテクチャを有するリコンフィギュラブルプロセッサの動的再構成の仕組み



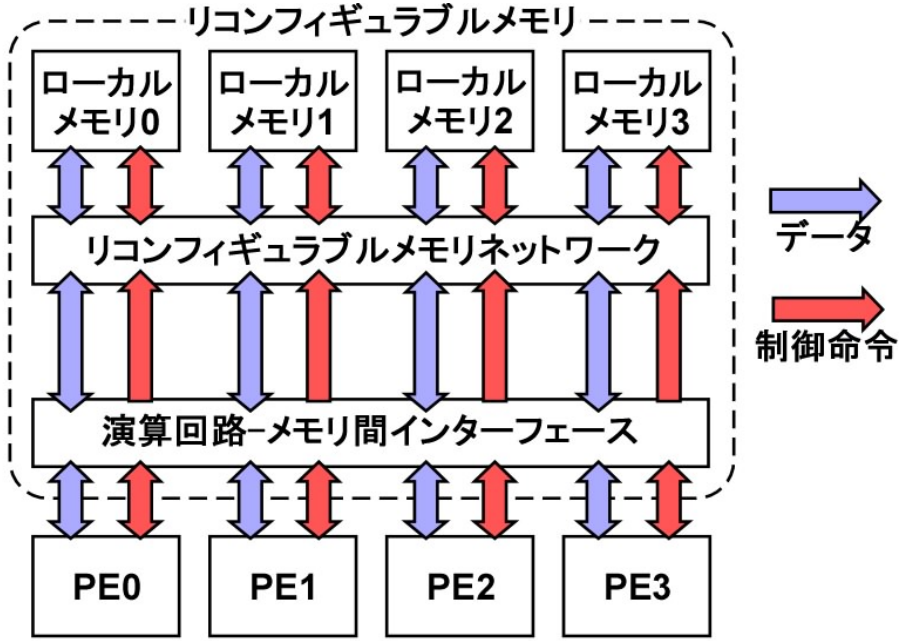
リコンフィギュレーションによる自己修復



リコンフィギュラブルプロセッサとメモリ間の高速データ転送



同一制御による並列データ転送

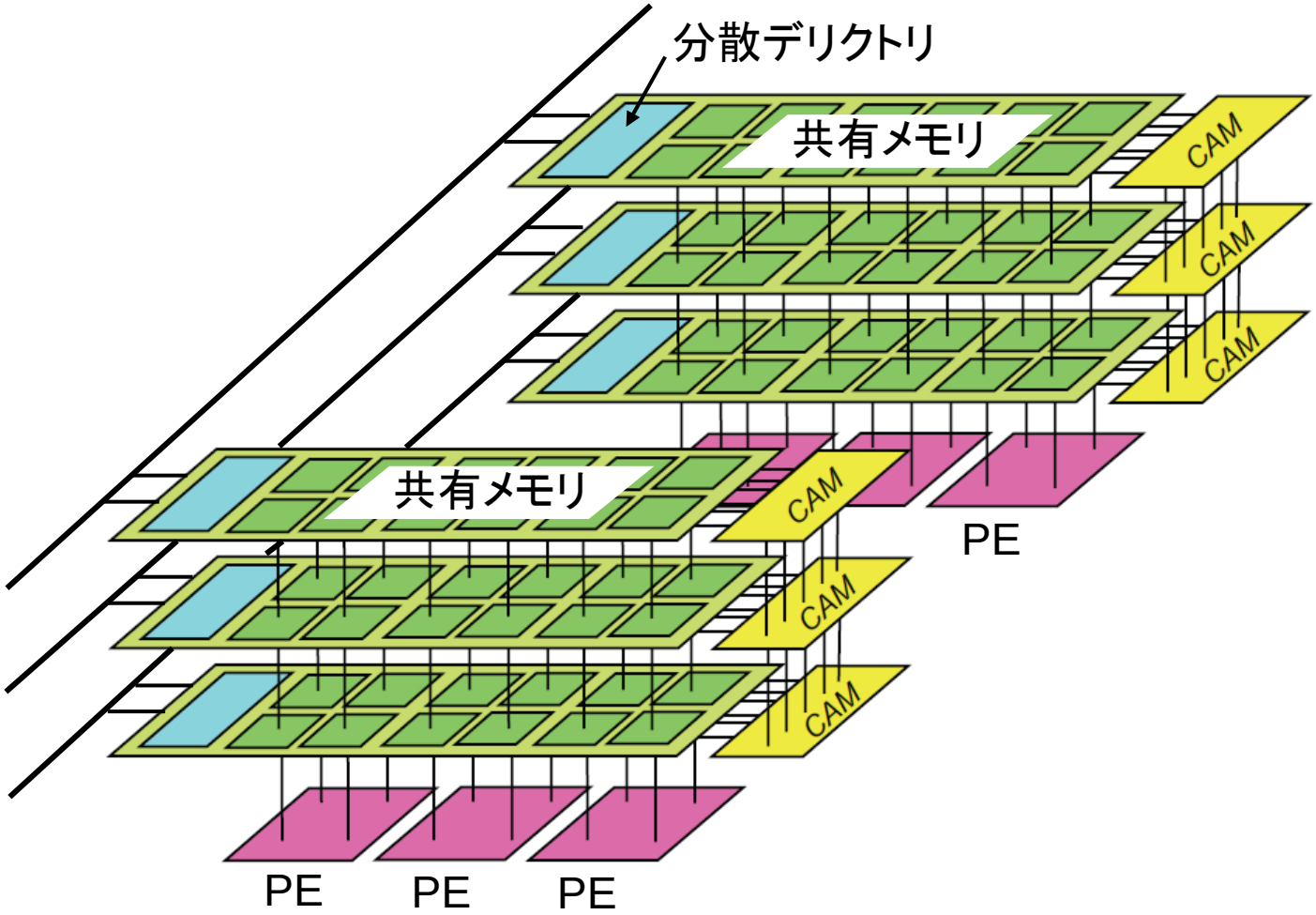


個別制御による並列データ転送

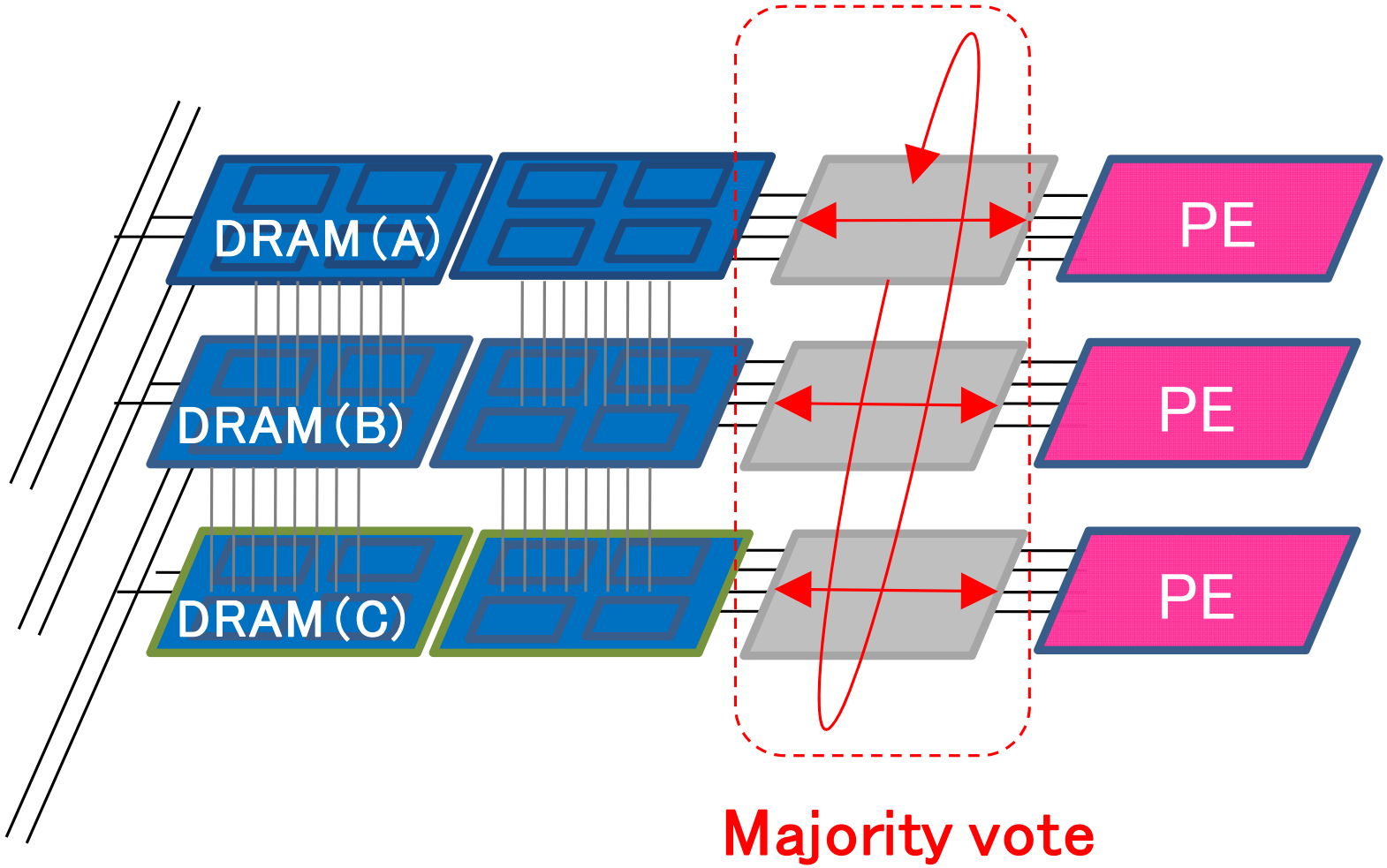
データ帯域幅の割り当て制御

データ転送命令毎に、演算回路－メモリ間のデータ帯域幅の割り当てを変更し、データ転送を実行

３次元積層型共有メモリを用いたリコンフィギュラブル並列プロセッサの構成

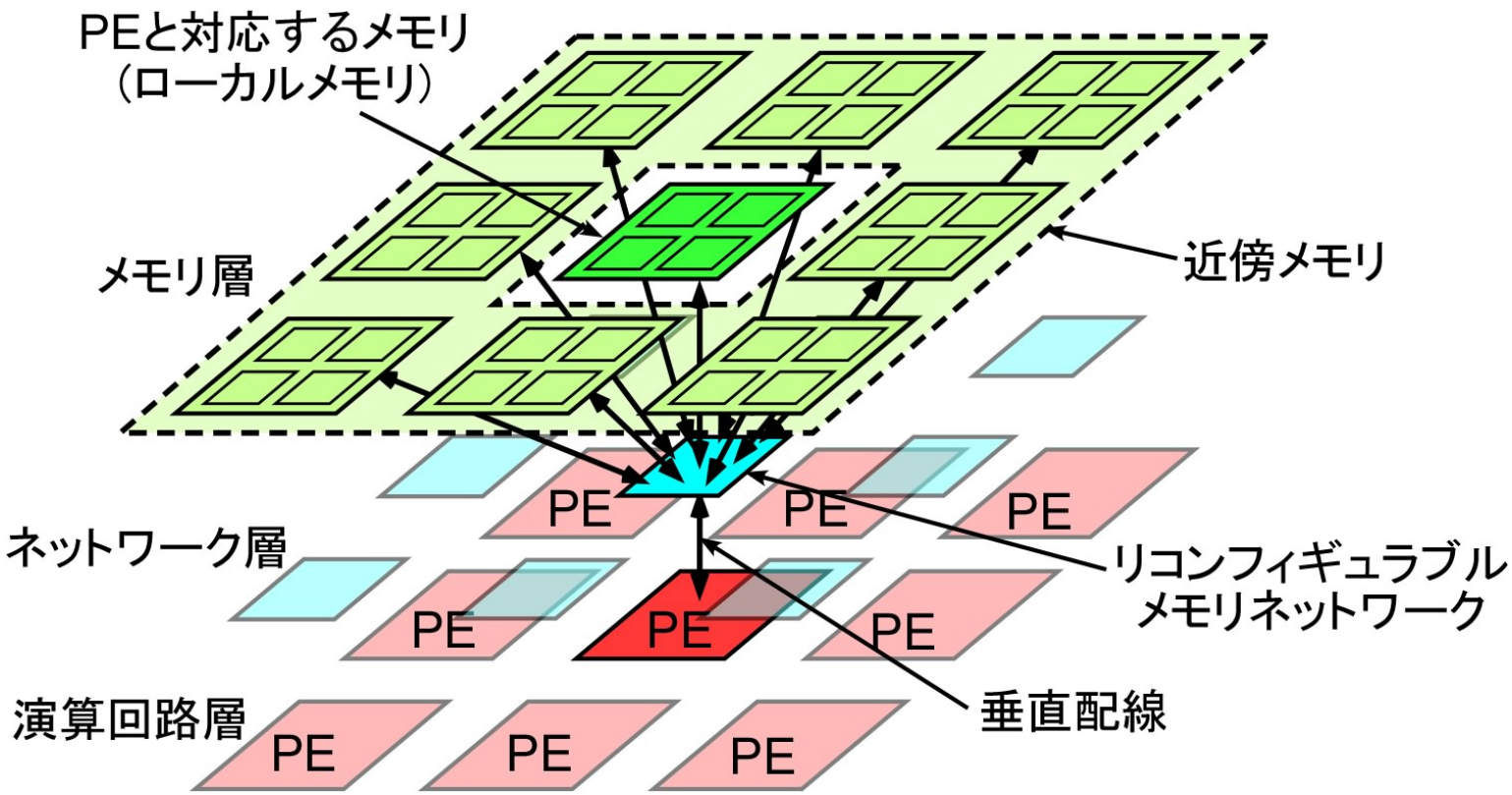


シミュレーションに用いた修復救済機能付 ３次元積層型共有メモリの構成



TMR（Triple Modular Redundancy）

リコンフィギュラブルメモリ空間の構成方法



研究実施計画（その1）

研究項目	H21年度 (5ヶ月)	H22年度	H23年度	H24年度	H　年度	H　年度 (　ヶ月)
１．応用システム設計および評価						
①車載用画像処理システムの信頼性設計 （鎌田ｸﾞﾙｰﾌﾟ）						
・概念および機能設計	←→	←→				
・評価システムの検討および評価		←→	←→			
・評価システムの実走評価および分析				←→		
②車載用超高精度ステレオビジョンシステムの開発と性能分析（青木ｸﾞﾙｰﾌﾟ）						
・位相限定相関法に基づく超高精度ステレオビジョンのためのアルゴリズム開発	←→	←→	←→			
・上記アルゴリズムのソフトウェア実装および性能評価	←→	←→	←→	←→		
・上記アルゴリズムのGPUへの実装および性能評価		←→	←→	←→		
・車載用超高精度ステレオビジョンのための３次元VLSIアーキテクチャの検討			←→	←→		
③ソフトウェア全体設計（小林ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→				
④ハードウェア全体設計（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→				

研究実施計画（その2）

研究項目	H21年度（5ヶ月）	H22年度	H23年度	H24年度	H　年度	H　年度（　ヶ月）
２．VMシステムによる不良救済技術						
①VMシステムによる不良救済技術の開発（小林ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→	←→		
②VMシステムのディペンダビリティ評価（鎌田ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		
③VMシステム/ハードウェアインターフェイスの検討（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→			
３．リコンフィギュラブル・ハードウェアによる不良救済技術						
①リコンフィギュラブルプロセッサの開発（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）						
・リコンフィギュラブルプロセッサ、メモリの設計、試作、評価	←→	←→	←→	←→		
・BIST回路、冗長回路の設計、試作、評価	←→	←→	←→	←→		
②リコンフィギュラブルロジックの開発（末吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→			
・修復・救済方式の検討・評価	←→	←→	←→			
③ハードウェア/ソフトウェアインターフェイスの検討（小林ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		

研究実施計画（その3）

研究項目	H21年度 (5ヶ月)	H22年度	H23年度	H24年度	H　年度	H　年度 (　ヶ月)
４．メモリ・ソフトエラー検出・救済技術						
①リコンフィギュラブルプ共有メモリの開発（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→	←→		
②ソフトエラー救済回路の検討（元吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→	←→		
③メモリ・ソフトエラー検出・救済のための3次元リコンフィギャラブルﾛｼﾞｯｸおよびCADの研究開発（末吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→				
５．テストチップ設計・試作・評価						
①リコンフィギュラブルプロセッサ、メモリテストチップの設計、試作、評価（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		
②3次元LSIテストチップ試作、評価（元吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		
③リコンフィギュラブルロジック・テストチップの設計、評価（末吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		
④３次元集積化技術の信頼性評価（小柳ｸﾞﾙｰﾌﾟ）（元吉ｸﾞﾙｰﾌﾟ）	←→	←→	←→			
⑤全体システムのFPGAへの搭載と全体性能評価（全ｸﾞﾙｰﾌﾟ）			←→	←→		

3.5年後の達成目標（VMシステム）

- 信頼性と性能のトレードオフを考慮したシステムのプロトタイピング完了
  - 3次元LSIのディペンダブル機能シミュレータの完成および機能・性能評価
    - 自己組織化に基づく自己修復型3次元LSIの要素技術の完成
  - ディペンダブル仮想計算基盤ミドルウェアのテストシステム完成および要素技術評価
    - 3次元ハードウェアのための仮想化技術・冗長・エラー回復計算環境を実現する要素技術の完成
  - ディペンダブル画像処理・認識システムの要素アプリケーションのテスト開発
    - 次世代ITSを支える高信頼画像認識・警報システムの基本アプリの完成

3.5年後の達成目標（全体システム）

・自己修復機能を有するリコンフィギュラブルプロセッサ搭載デペンダブルシステムをFPGAで実現

・アプリケーションの動作確認

（HOG+線形SVMアルゴリズムによる歩行者検出等）

HOG: Histograms of Oriented Gradients
SVM: Suppoet Vector Machine

・システム全体で70000FIT以下の信頼度見通し達成

（10年間、毎日4時間使用で、1回故障）

109/(10×365×4)/1=約70000FIT

3次元LSIの信頼度2000FIT以下

H21年度の研究内容（小柳グループ）

・ディペンダブル・リコンフィギュラブルプロセッサ

　コンフィギュレーションデータによりプロセッサがSIMD型、MIMD型に変化するリコンフィギュラブルプロセッサの基本設計を行う。また、このシステムに搭載するBIST回路、自己診断回路、自己修復回路の基本構成について検討するとともに、システム性能に及ぼす自己診断、自己修復タイミングおよびスケジューリングの影響についても評価する。

・ディペンダブルメモリの設計

　システムに搭載する画像データ蓄積用のフレームメモリ、並列プロセッサシステムのための共有メモリ、コンフィギュレーションデータを格納するコンフィギュレーションメモリ等のメモリについて、３次元積層化・多重化によるディペンダビリティの向上を評価する。

・３次元LSIテスト回路の設計

　自己修復機能を有する３次元VLSIシステム用のBIST回路、自己診断回路、自己修復回路を設計、評価する。

H21年度の研究内容（小林グループ）

・アプリケーションの特性を考慮した3次元のVLSIハードウェアの構成技術

各設計粒度で三次元積層化を施し，性能，消費電力，コストの点から評価をおこない，ハードウェアのアプリケーション毎のカスタマイズ化のための基本技術の検討を行う．．

・ディペンダブルなアプリケーションスケジューリング機構

ハードウェアヘルス(障害)情報・性能予測情報・消費電力予測情報・温度予測情報などの動的モニタリングとその定量化について検討する。更に，これらの入力パラメータに基づく最適ジョブスケジューリング機構の検討を行う.

H21年度の研究内容（青木グループ）

・位相限定相関法に基づく超高精度ステレオビジョンのためのアルゴリズム開発

位相限定相関法の高精度化手法として，窓関数の適用，スペクトル重み付け，相関ピークモデルのフィッティング，高速化手法として，位相限定相関法の1次元化，対応付けのロバスト化手法として，3階層程度の階層探索を用いることを検討する。本年度は，従来の2次元位相限定相関法に基づく対応付けアルゴリズムの1次元化を行うとともに，これによる性能向上を評価する。

・上記アルゴリズムのソフトウェア実装および性能評価

位相限定相関法に基づく各種アルゴリズムをソフトウェア実装するとともに，高精細ステレオビジョンシステムで撮影した画像を用いて，1次元および2次元位相限定相関法の定量的な性能比較を行う。

H21年度の研究内容（末吉グループ）

不良救済技術およびメモリ・ソフトエラー検出・救済技術に関し，実現可能性の検討を行う。また，ベースとなる層構造としてロジック部，スイッチ部を各層に備える機能分割積層型と各層毎にFPGAを備える領域分割積層型，およびその他構造の初期検討を行う。

H21年度の研究内容（鎌田グループ）

処理量が制御系に比べ3～４桁多い自動車の認識系、HMI系システムに対する要件分析を行うとともに、システム、機能の概念設計を行う。

H21年度の研究内容（元吉グループ）

メモリ・ソフトエラー検出・救済を中心とした自己修復機能を有する3次元LSIテスト回路の設計を行うとともに、３次元LSIテスト回路の試作に必要な3次元LSI技術のプロセス最適条件について検討する。