

未来社会創造事業 次世代情報社会の実現領域

高速ビジョンによる 多次元デジタルツイン計測と再構築

東京理科大学

石川正俊

デジタルツインとは

デジタルツイン：実世界の中の実物体を計測し、情報世界における代替としての表現とその活用を目指すもの

- デジタル情報が有する コピー、編集、検索、保存、操作の容易さ
 - 実物体が有する 実時間、実空間、リアリティ、インタラクティブ性
- ⇒ 時空間を含む多次元情報の高解像度化が「モノ」としての価値を生む

実物体の計測：時空間情報、その他のモダリティの高分解能計測
課題：実世界・実物体の完全理解 = サンプリング定理の遵守

情報世界での表現とその活用：高分解能時空間多次元情報の活用
課題：対象の表現・操作における十分な分解能・帯域の確保

実世界と情報世界の相互作用：同期性、同一性、リアリティの実現
課題：IOボトルネックの排除と低遅延インタラクションの実現

空間解像度のみ注目した従来のデジタルツインでは
単なる静的デジタルデータの域を出ない

1990年に提案した知能システムの構造

1990年に提案した知能システムとしてのセンサフュージョンシステム

⇒ デジタルツイン

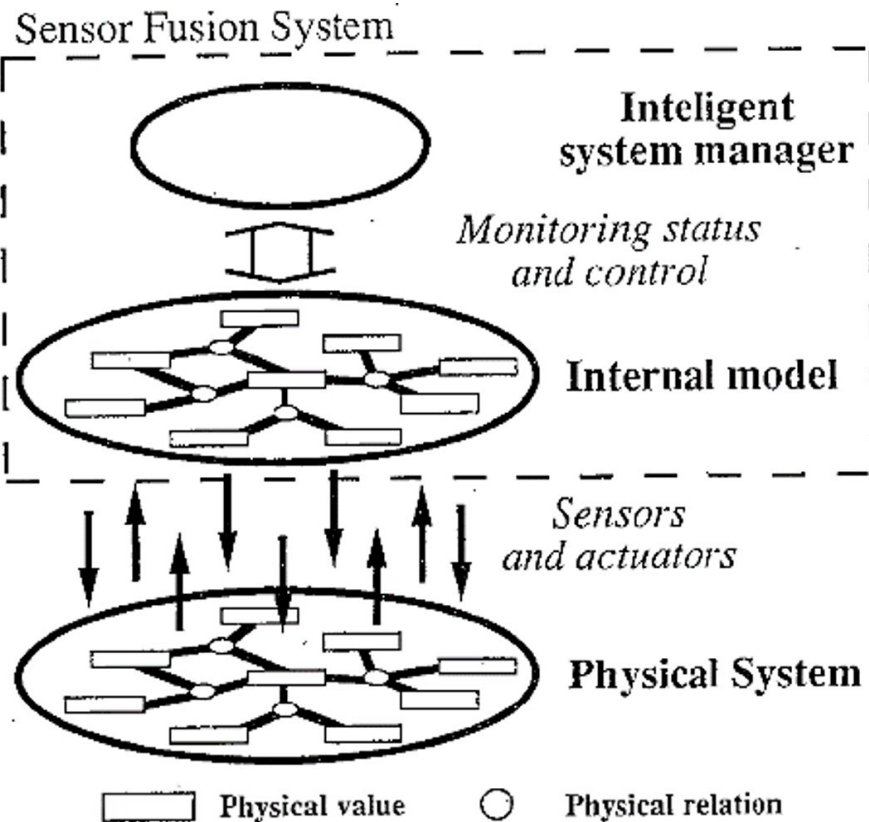


Fig. 1 Sensor fusion system using internal model.

実世界の物理システムを動的並列システムとみなし、知的システムとして、再構成したうえで、認識・制御する構造を提案。
→ 知能システム(CPS)の基本構造を示した。

センサフュージョンの基盤技術の開発に関する研究プロジェクト(1991-1995)

実世界の理解とその活用のために、新たなコンセプトとして、

- ・ インテンショナルセンシング
 - ・ リアルタイムパラレルプロセッシング
- を提案。

その際、十分な時間的空間的分解能と能動性がキーとなることを指摘。

高橋昭彦, 石川正俊: 物理ネットワークによる内部表現を用いたセンサフュージョン, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.7, pp.803-810 (1990)

山崎弘郎, 石川正俊編著: センサフュージョン-実世界の能動的理解と知的再構成- (山崎弘郎, 石川正俊編), コロナ社 (1992.11.10)



基本的な考え方と着目する問題の本質

Computation Cost/Bottleneck
コンピュータの高速化

Communication Cost/Bottleneck
ネットワークの高速化

I/O and Interaction Cost/Bottleneck
未解決

時空間密度の不足
高速性の欠如、大きな遅延の存在
物理系との不整合
違和感の存在、没入感の不足
人間の能力の限界

タスク分解問題

階層的並列分散構造を有する認識行動システムのアーキテクチャ
直列分解(垂直分解)から並列分解(水平分解)、さらに直交分解へ

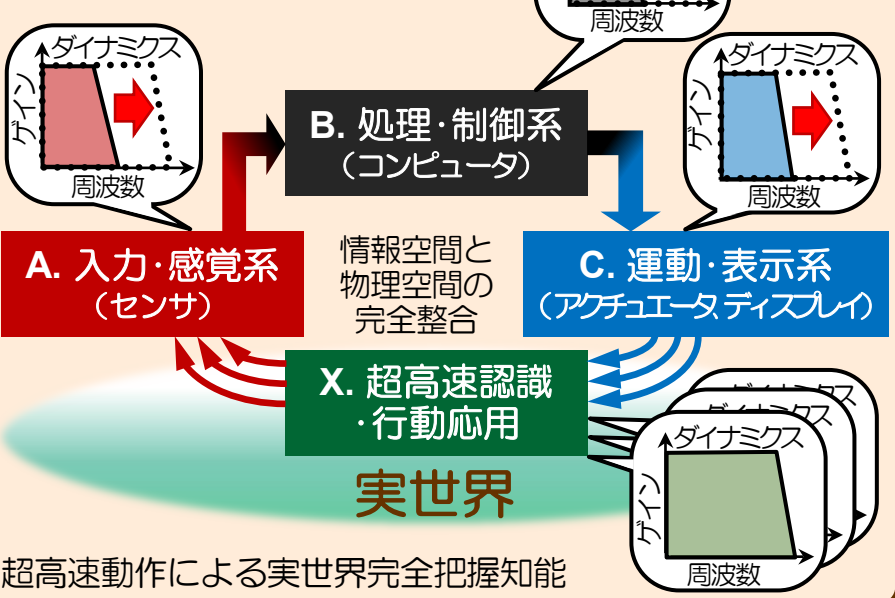
ボトルネックの解消
遅延要因の解消：理論、アーキテクチャ、アルゴリズム、デバイス等



各階層における情報表現・計算理論に基づく全体最適化問題

ダイナミクス整合

感覚系・処理系・運動表示系が対象のダイナミクスをカバーした知能システム



時間軸の整合性を取った高速知能システムの世界 → 産業構造の変革、新しい価値の創造



知能システムにおける遅延問題

高速知能システム（CPS）における遅延要因の現状

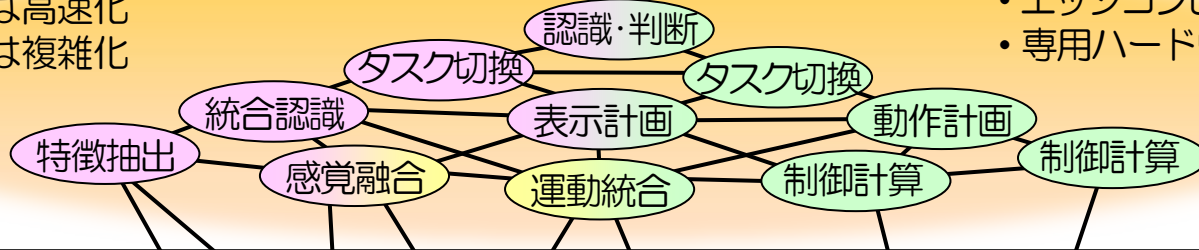
知的処理の演算速度

- ・ハードウェアは高速化
- ・アルゴリズムは複雑化

サイバー空間

知的処理の演算速度

- ・エッジコンピューティング
- ・専用ハードウェアの進歩



ネットワーク

ネットワークの時間管理

- ・タイムスタンプでは解決できない同期ずれ問題

ネットワークの遅延

- ・5Gでは平均遅延は改善
- ・最悪遅延の問題は残る

入出力ボトルネック

- ・入出力で大きな遅延
- ・人間を目標とすることの弊害

処理・通信が速くても…

- ・5Gでも遅延は残る
- ・GPUのデータ転送限界

インターフェイス







物理空間



HMDによるVR/AR/MRの課題

実空間+仮想空間での作業/エンターテイメント/ゲーム

	Apple Vision Pro *1 	Microsoft HoloLens 2 *2 	Meta Quest 2 *3  <small>Quest 3は、現時点でスペック不明</small>	石川グループ研究室 3D計測+高速投影 *6 
フレームレート	90 fps (非公式情報)	60 fps	120 fps	1,000 fps
遅延	12 ms *1 映像入力から表示まで。 計測と処理を含まず。	52 ms *4 レンダリングから表示まで。 計測含まず。	45 ms *5 ハンドトラッキングから表示まで。	4.3 ms *6 計測から表示までの全過程。
拘束性	有り(HMD)	有り(HMD)	有り(HMD)	無拘束(室内)
表現力	遮蔽型、個人視点	透過型、個人視点	遮蔽型、個人視点	投射型、共有視点

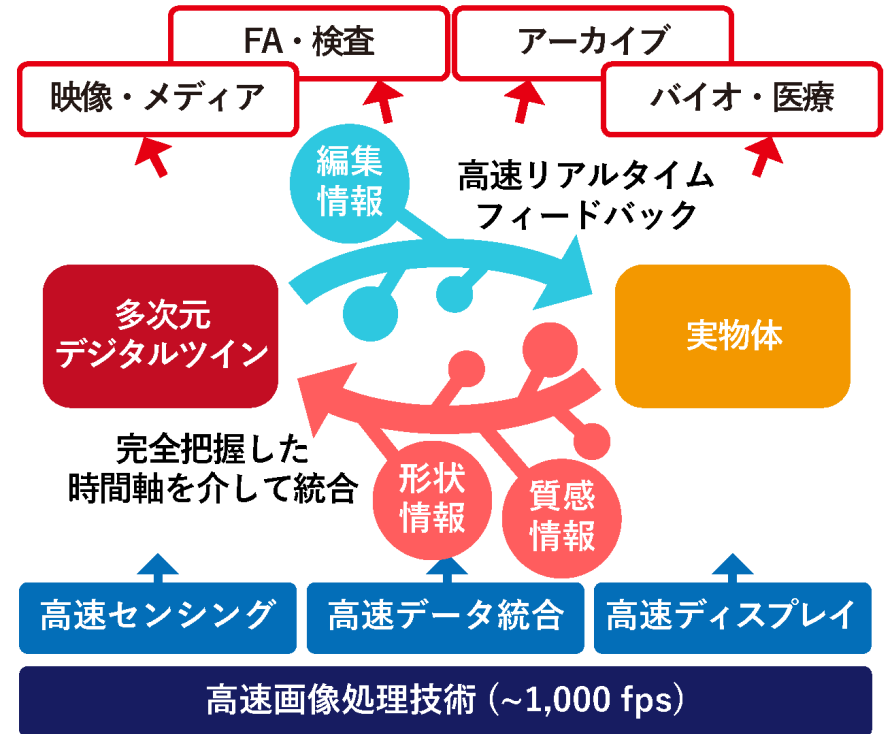
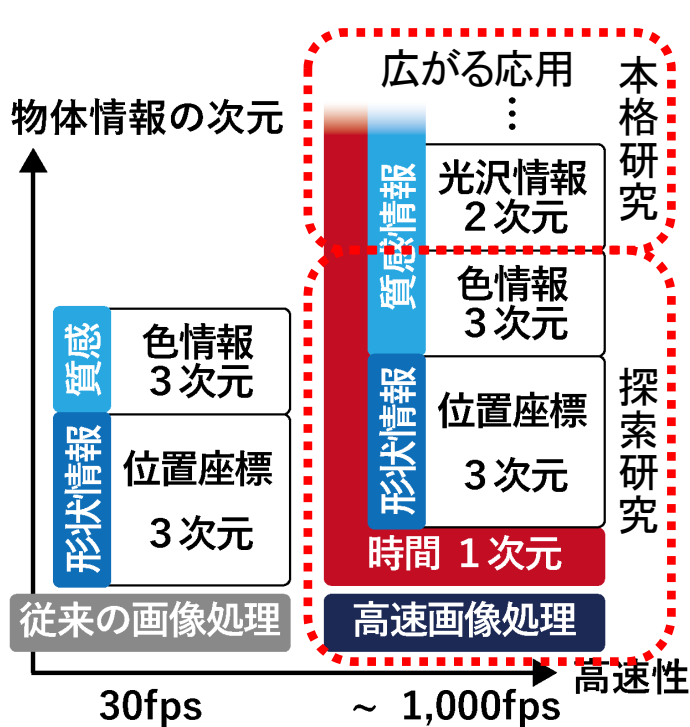
⇒ 従来のHMDでは実現できない世界を独自の技術(高速ビジョン、高速ディスプレイ)で構築する。

*1 <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>, *2 <https://www.microsoft.com/ja-jp/d/hololens-2/91pnzznzwcp>, *3 <https://www.meta.com/jp/quest/>,
 *4 Schnierle, et al.: Latency and sampling compensation in mixed-reality-in-the-loop simulations of production systems. *Prod. Eng. Res. Devel.* **17**, 341–353 (2023),
 *5 Abdikarim, et al.: A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2. *Behav Res* (2023),
 *6 門脇他: 身体感覚と視覚情報にずれが生じる没入環境における低遅延な映像のユーザーへの影響, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, 24, pp.23-30 (2019)



高速ビジョンが情報をつなぐ

- 高い時間分解能で、対象のダイナミクスをカバー
- 形状・色に加えて、多次元情報の獲得と活用
- 時間軸を基軸とした時空間データ統合による空間解像度の向上



高い時空間解像度で多次元デジタルツイン構築



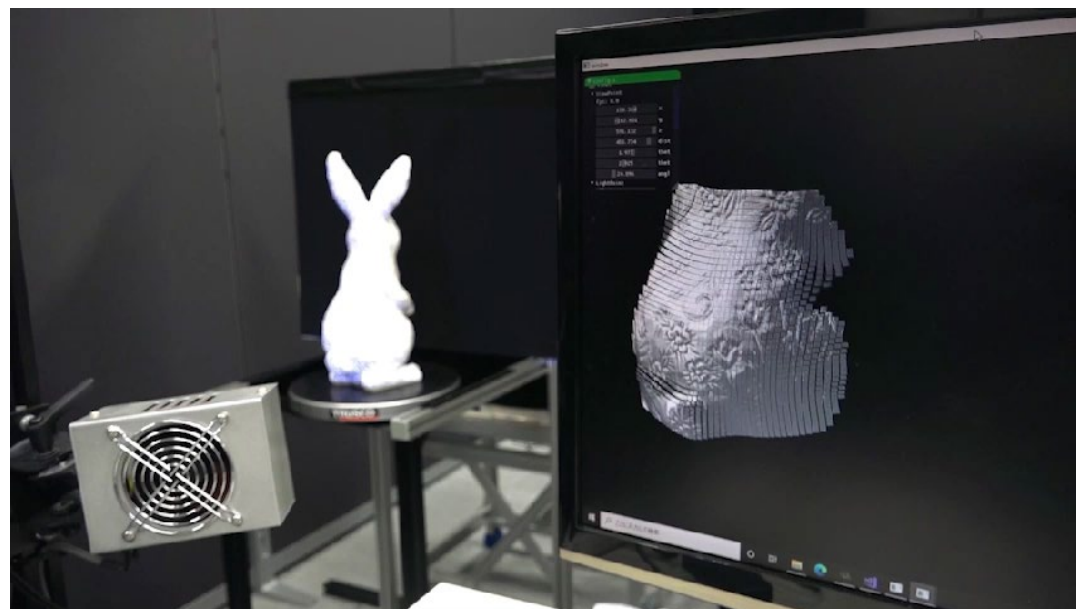
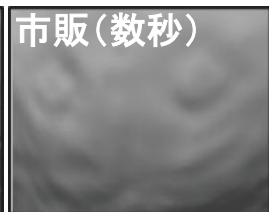
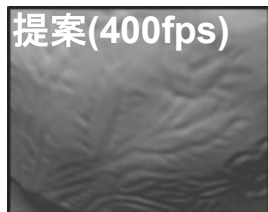
形状情報と色情報の高速計測

- デジタルツインの高速構築に向けた3D形状計測の高速化および高密度化
 - 複数の近赤外波長を用いて深度と法線を同時計測
 - 深度と法線を考慮した高密度化、ブロック並列最適化により統合
 - 400fpsでリアルタイムにピクセルワイズの再構成を実現



提案(400fps)

市販(数秒)

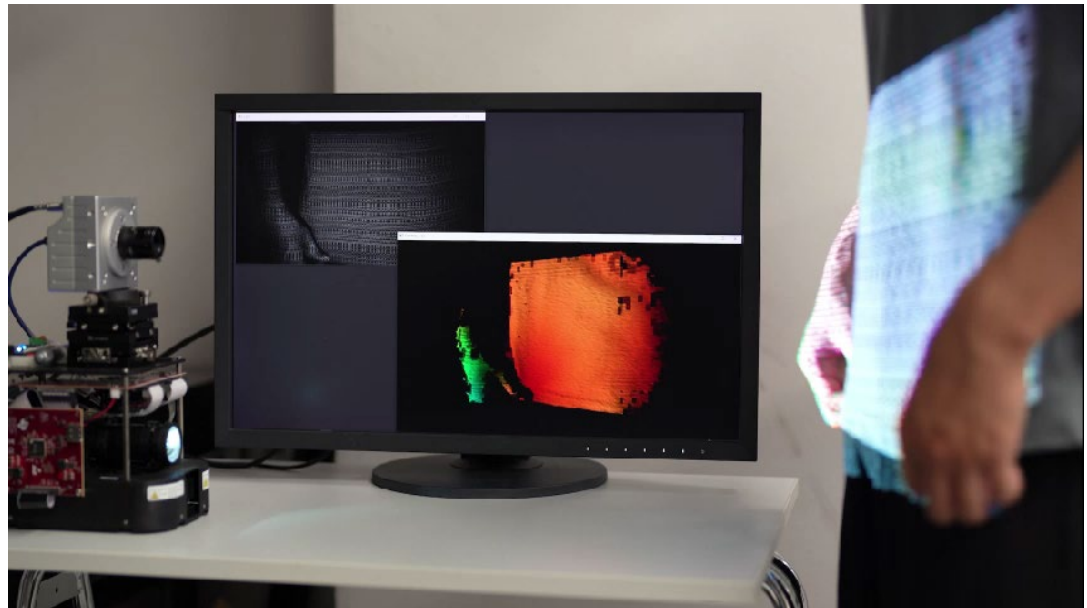
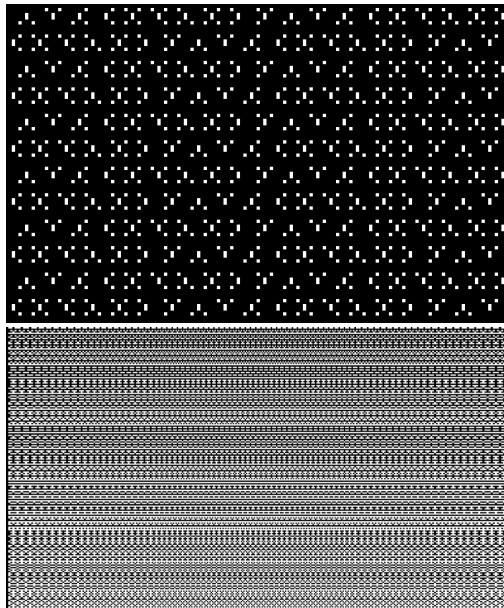


高密度化に計算時間を要するため
ベースとなる3次元形状計測の改良



形状情報と色情報の高速計測

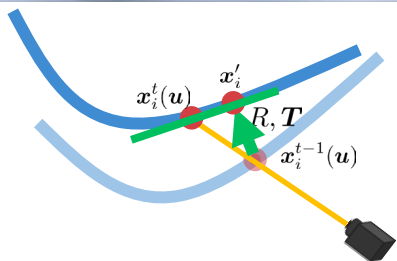
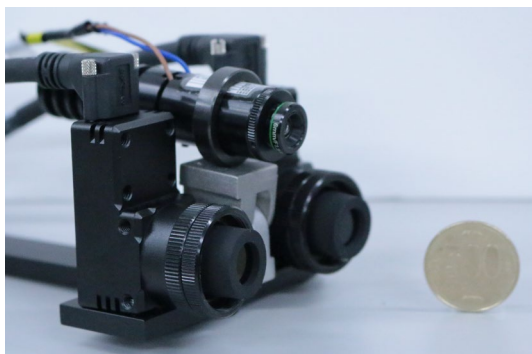
- パラレルバスパターンを新規開発
 - 物理的平行化とクロック行による高速低遅延デコードアルゴリズム
 - De Bruijn torusによる情報量の最大化
 - 1,000fpsを維持しながら16.7倍の計測密度を実現



色情報計測との統合を含めた計測手法を開発

高時間分解能データを活用したデータ統合

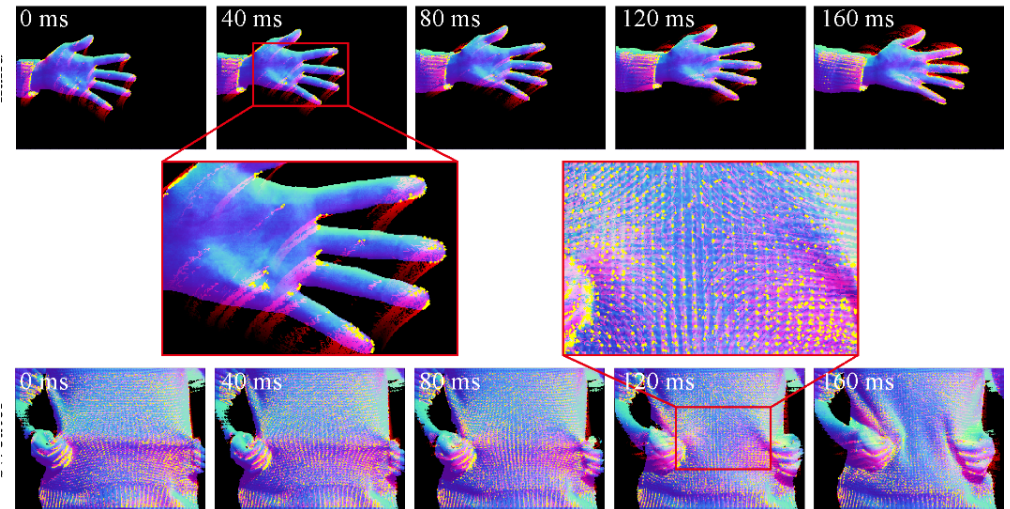
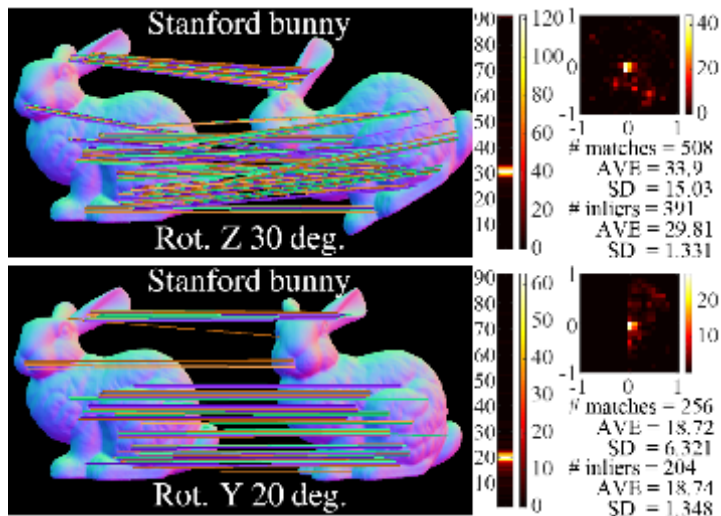
- 高時間分解能を利用した3次元形状統合手法の開発
→ 探索範囲が限定できるため1,000fpsの高速形状統合が実現
- 3次元形状を計測する小型デバイスの開発
→ ロボットや光学系への組み込みを進める



対応点探索が形状情報に依存しているため、
色情報を含めた高速統合アルゴリズムを開発

高時間分解能データを活用したデータ統合

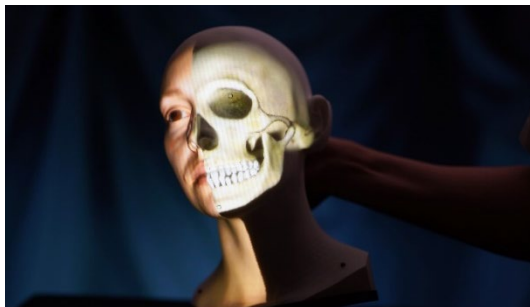
- 時空間的近傍の詳細を比較し、対応点を高速取得する手法を開発
→ 並列計算により、対象全体に対して750fpsの対応付けを実現
- 高速性を維持したうえで、非剛体へも対応



対応付けに基づく高速データ統合手法を開発

時間軸の完全把握・制御 - 再構築 -

- デジタルツイン再構築の基本となるDPMシステムの構築
 - 映像投影によりテクスチャとダイナミクスを編集する手法を開発
 - 1,000fps, 6ms遅延のリアルタイム編集を実現



計測や投影の高速性に
応じたリアルタイム高速CG生成技術が必要

時間軸の完全把握・制御 - 再構築 -

- 人間の視覚特性を利用した高速CG生成技術の開発
 - 低速高品質CGと高速低品質CGを重畳
 - 人間は錯覚により高速高品質のアニメーションを知覚
 - 品質を下げずに最低14倍高速化できることを被験者実験により確認



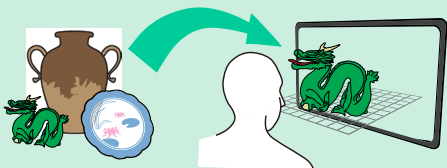
モデルベースから、高速計測をベースとしたリアルタイム編集フレームワークの構築



応用展開

高速多次元デジタイザ

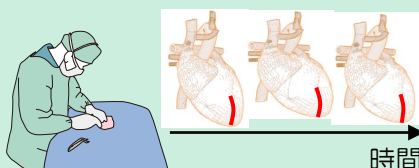
大量物体の高速デジタル化
製品管理、高速検査・検索
ネットショッピング、ゲーム



高速3Dセンシング、高速データ統合

医療用3次元DPM

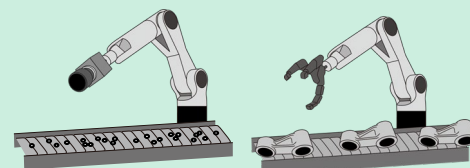
身体や臓器の動的計測
多次元情報による診断
DPMによる手術支援



高速3Dセンシング、DPM技術

生産ラインへの導入

大量の対象を無停止検査
高速対象の生産ライン
個体差が大きい不定形対象



高速3Dセンシング、高速光学系

リアルワールド・リアルタイム・デジタルツイン型情報環境

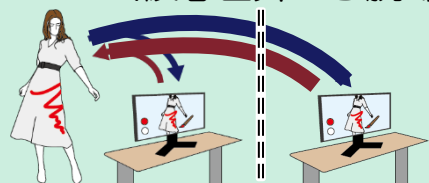
無拘束、低遅延で、極限のリアリティを表現できる情報環境

メタバースを超え、HMDを超えるもの

高速に運動する対象、変形する対象

デジタルツインの リアルタイム再現

情報世界と実物体をリンク
物体と空間の共有、編集
HMD式仮想世界から脱却



高速3Dセンシング、DPM

対象の時空間特性を完全把握した デジタルツインの実現と その新しい情報環境への応用展開



WINDS ネットワーク

高速画像処理の更なる普及
と用途拡大、新規産業創出

226 組織 (198法人) 6月21日現在
部や課での加入も可能。

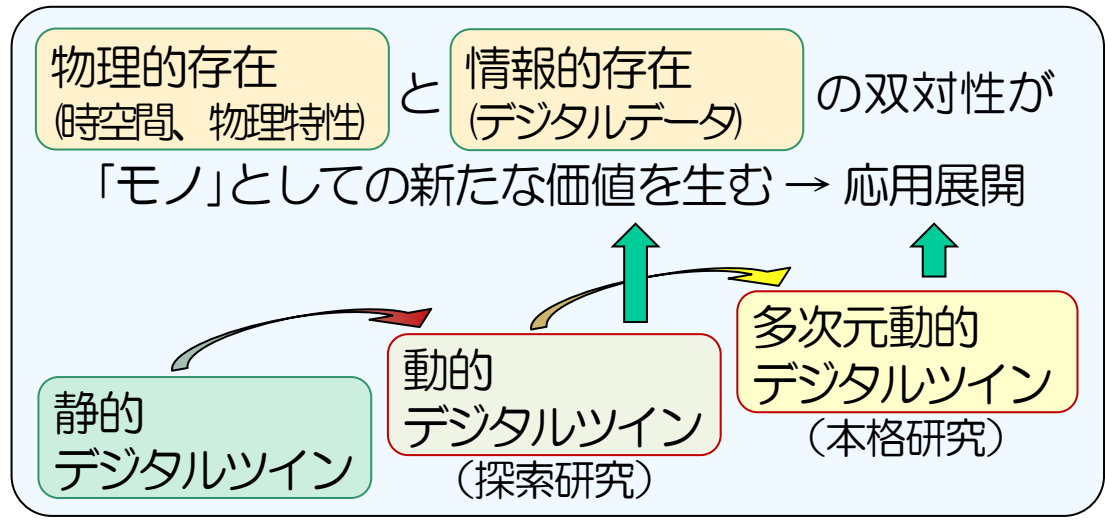
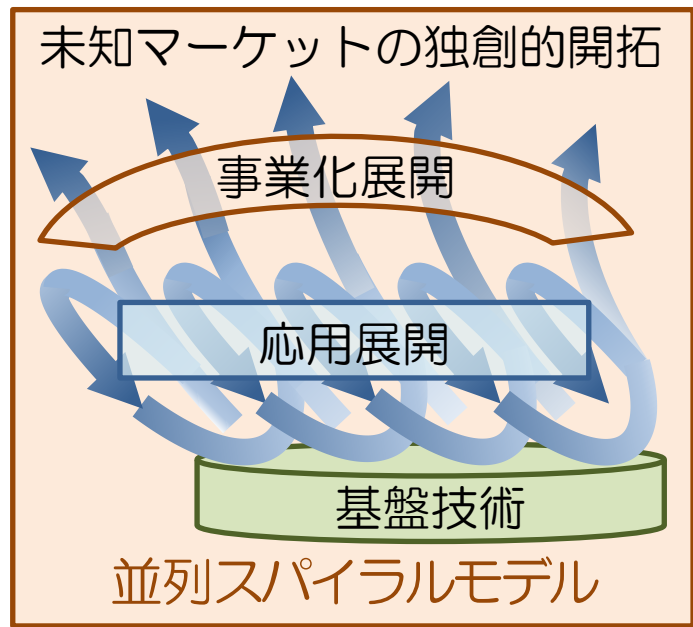
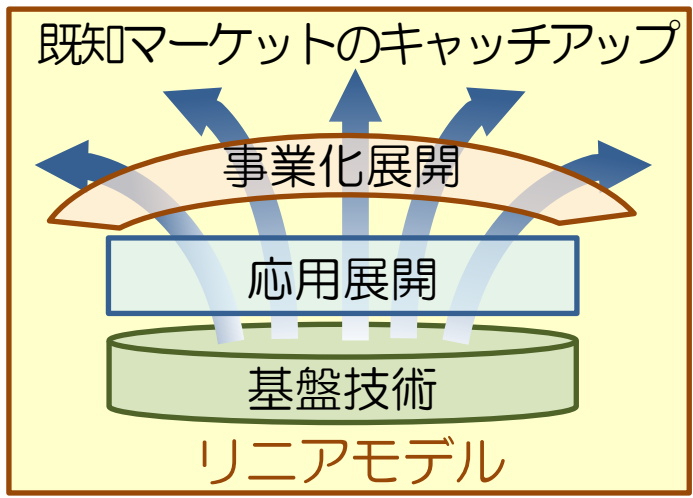
高速トラッキング カメラネットワーク

広域・高速走査・トラッキング
セキュリティカメラネット
スポーツサイエンスへの応用



高速3Dセンシング、高速光学系

研究開発モデルから生まれる新たな価値



映像・メディア、知能ロボット、FA・検査、自動車・交通、
バイオ・医療、ヒューマンインターフェイス、スポーツ・
ファッション・食品

PoCの製作と発信、社会受容性の評価・フィードバック

ビジョンチップ、高速画像処理、高速知能システム、高
速3次元計測、高速トラッキング、高速ディスプレイ、
高速検査、アクティブビジョン、高速ロボット・ハンド、
ダイスミクス整合、タスク分解