

多点瞬時解析高速ビジョンによる 運動/変形物体のリアルタイム三次元センシング

渡辺 義浩* 小室 孝* 石川 正俊*

Real-time Three-dimensional Sensing for a Moving/Deforming Object using High-speed Vision for Numerous-point Analysis

Yoshihiro Watanabe*, Takashi Komuro* and Masatoshi Ishikawa*

This paper describes a real-time three-dimensional sensing system for applications based on feedback automation. The proposed system enables to observe a moving/deforming object at high frame rate and can acquire data in real-time. These are provided by three distinctive features, three-dimensional sensing by a single frame, high-frame-rate imaging and high-speed image processing. We also present some results of evaluation experiments. The experimental results show the advantages of our system compared with conventional approaches. Our system is expected to achieve improvements in a wide range of three-dimensional-sensing applications.

Key Words: Three-dimensional Sensing, Real-time Image Processing, High-speed Vision

1. はじめに

外界の三次元情報を計測する三次元センシングは、広い応用分野でニーズの高い重要な技術である。特に、画像を用いた手法は、非接触かつ柔軟な計測を提供するものであり、有用性が高い。現在、同計測は、精度、測定距離、計測速度、コスト、サイズなど、アプリケーションの現場で生じる様々な要求に対応し、多様化が図られている [1] [2]。

これに対し、ロボット制御に代表されるリアルタイムアプリケーションにおいて、三次元センシングを用いることはこれまで難しかった。これは、(1) 運動中の物体の計測保証と、(2) 高い計測速度の二点に関する機能が不足していたためであると考えられる。本論文では、このような問題を解消する三次元センシングシステムの実現を目的とする。これは、あらゆる外界の認識において、精度や柔軟性の面から新たなアプローチを試みる余地を生み出すための重要な課題である。特に、本システムが有効に活用される応用展開分野として、(A) ロボティクス、(B) 工業製品検査、(C) 自動車応用、(D) マンマシンインターフェースなどが挙げられる。

(A) ロボティクスでは、運動中の物体に追従してロボットを動作させる局面が数多くある。同時に、センサをフィードバックループに組み入れる場合、一般的なサーボコントローラの制

御レートを反映すると、センサ出力のスループットは1[kHz]程度とすることが望ましい [3]。これらの条件は、三次元センシングの導入を困難にしていた。例えば、その導入が有効な近年の新たな事例として、生体の動作を止めずに手術を実行する医療現場のための支援ロボットがある。これまで心臓外科手術に関して、高フレームレートカメラを用いた事例が報告されているが [4] [5]、同報告では対象の上下運動を捉えるのみで、その形状までは観測できていない。これに関して、形状取得を行う試みもあるが [6]、センサ性能は上記の条件を満たしていない。

このほかにも、(B) 形状欠陥検出のための工業製品検査において、リアルタイム三次元センシングは必須の技術である。前述の (1)、(2) の課題が満たされた場合、検査速度は大幅に向上し、抜き取り検査から全数検査への展開に貢献できると考えられる。また、(C) 自動車応用では、走行車両からの路面形状の三次元センシングを、路面検査や走行制御へ用いることが想定される。さらに、(D) マンマシンインターフェースでも、三次元情報を利用することで明るさや姿勢の変動の影響を受けずに人間の動作をとらえることができるため、同センシングの導入は価値が高い。これらの (B)~(D) の三つの応用事例において要求されるセンシング性能は、対象動作の速度に応じて個別に決定される。なお、本論文では、kHz レベルのサンプリングレートを十分条件とする。

このような背景の下、本論文で提案するシステムは、単一画像での計測完了、高フレームレートイメージング、高速視覚情報処理の統合によって、運動/変形物体のリアルタイム三次元センシングを実現するものである。特に、上記の (A) ロボティク

原稿受付 2007年1月15日

*東京大学大学院情報理工学系研究科

*Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

スでのニーズから、kHz レベルのスループット、ms レベルのレイテンシを計測速度に関する要求仕様とする。また、高フレームレート観測によって取得される時系列情報を利用した三次元演算手法を新たに提案する。さらに、このような構成に基づく三次元センシングの有効性を評価実験において検証した。検証の結果、スループット 955 [Hz]、レイテンシ 4.5 [ms] で、運動/変形物体に対する計測が可能であることを示した。

2. リアルタイム三次元センシングの課題と方針

本論文が提案するシステムは、次の三機能の統合によって、リアルタイム三次元センシングを実現するものである。

二次元パターン照射プロジェクタ アクティブステレオを実施するために、既知の二次元パターンを照射する。

高フレームレートイメージング 現象観測精度の空間/時間分解能を上げるために、高いフレームレートでの撮像を行う。

高速視覚情報処理システム 高スループット/低レイテンシで三次元情報をリアルタイムに取得するために、視覚情報処理を高速に行う。

本章では、これらの統合によって、運動/変形物体に対する三次元センシングが新たに可能となることを述べる。

これまで画像ベースの三次元センシングでは、Time of Flight 法、レーザ走査法、モアレ縞法、光干渉法、構造化光法など様々な手法が試みられてきた [1] [2]。特に三角測量に基づくレーザ走査法や構造化光法は、単純なセットアップで mm 程度の十分な精度を確保することができるため、三次元情報を必要とする多くのアプリケーションで採用されている。この二つの手法は、三次元マップを取得するために必要となる画像枚数に関して異なる。前者は点光源やスリット光を走査し、多数の画像を統合する必要があるのに対して、後者は既知の二次元パターンを一度に照射することで、小数の画像から三次元マップを取得する。二次元パターンの工夫により、その数は一枚にまで縮小可能である。

これらの手法について、計測対象運動に関する許容速度と三次元情報を取得する頻度の特性に関する比較を Fig. 1 に示す。図に示されるように、走査手法によって、両者の特性を満足するためには、フレームレートを大幅に上げる必要がある。しか

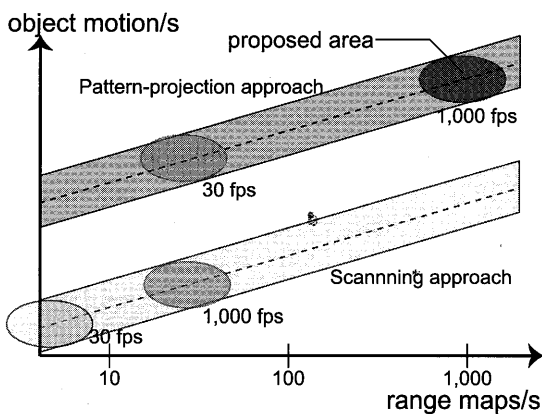


Fig. 1 Performance comparison of three-dimensional measurement approaches

し、これは蓄積時間の低下による画質の低下と、それに伴う照射光強度の大幅な向上を伴うため、実用的に困難であると考えられる。

これに対して、二次元パターン照射に基づく手法では、単一画像で計測が完了するため、フレーム間で対象が動いてよく、対象運動に関する制約を大幅に軽減することができる。同時に、高スループット/低レイテンシでの三次元センシングを提供できる余地がある。これらの観点から、同手法は今回の目的において極めて有効に働くことが分かる。分解能を一定の測定領域にしか確保できない問題があるが、これは次の二つの理由から致命的ではないと考えられる。まず、測定範囲が限定される場合でも、有効なアプリケーションが多く、このようなセンシング技術の実現は十分に価値が高いことが挙げられる。次に、照射パターンを能動的に変化させる新たな機能を追加することで、このような問題を回避できる点が挙げられる。

続いて、二次元パターン照射に基づく手法を用いた運動物体のリアルタイム三次元センシングを成立させるためには、二つの条件を新たに満たす必要がある。まず、時間と空間に関する分解能の両立を図るために、高密度なパターンの高速変化を詳細に捉える必要がある。これは、本節の冒頭で述べた二点目の高フレームレートイメージングによって満たされる。

さらに、同手法が要求する処理量は大きく、情報取得のスループット、およびレイテンシに関する性能を確保するためには、処理速度の飛躍的な向上が必要となる。これは、三点目の高速視覚情報処理によって満たされる。

このような三機能の統合による運動/変形物体のリアルタイム三次元センシングを本論文では新たに実現する。なお、今回のシステムにおいて、すでに提案されているものは、三次元センシングの計測原理のみである。同センシングを遂行するための機能統合に基づく方針をはじめとして、処理システムの構成や、内部の演算手続き、実証された性能は、本論文が新たに提案するものである。特に、二、三点目の機能を実現するためのビジョンシステムとして、我々が新たに実現した多点瞬時解析高速ビジョンを用いた。

3. 多点瞬時解析高速ビジョンに基づくリアルタイム三次元センシング

本章では、提案システムの全体構成、要素技術となる原理、および多点瞬時解析高速ビジョンについて述べる。

3.1 全体の構成

本三次元センシングシステムの全体構成を Fig. 2 に示す。本システムでは、単一画像で三次元センシングを遂行するために、校正のとれた多数の点光源で構成されるマルチスポットパターンをレーザ照射する手法を採用する。このほかにも、複数スリットや格子状のパターンの利用 [1] や、色情報の利用 [7] も考えられる。これに対して、画像処理を簡素化し、処理速度の向上を図る点と、スポットによる各点の位置情報の精度向上、レーザによる光強度の確保の三点から、今回は同パターンを採用した。これらは、高フレームレートイメージングと、高スループットかつ低レイテンシでのリアルタイム三次元センシングを実現するために必要な条件である。また、同パターンはレーザとレン

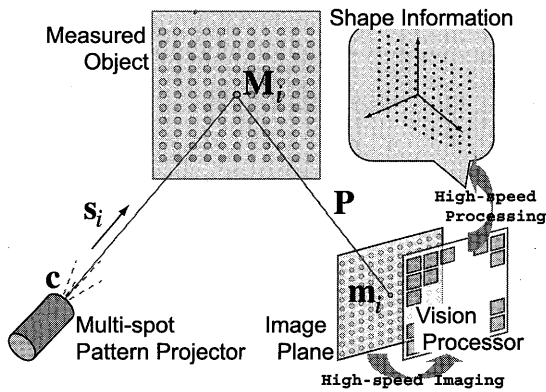


Fig. 2 Three-dimensional measurement system based on high-speed vision for numerous-point analysis

ズのみで生成されるため、プロジェクタを小型化できる利点もある。これを利用し、移動ロボットのためのコンパクトなレンジセンサの開発事例 [8] も報告されているが、1 [kHz] レベルのリアルタイム三次元センシングのための手法として利用することは、処理速度の観点から困難であった。

3.2 計測原理

マルチスポットパターンに基づく三次元センシングの原理を Fig. 2 に示す。計測されるそれぞれのスポットは、プロジェクタから伸びる投影直線と、視点から伸びる直線の交点に位置する。このため、これらの直線の幾何的な位置関係が既知であれば、空間点 $M_i = [x_w, y_w, z_w]^t$ は、画像点 $m_i = [X_v, Y_v]^t$ から取得できる。ここで、添字 i は、それぞれの投影スポットの番号を示す。投影直線を式 (1) に示す。

$$M_i = c + \delta s_i \quad (i = 1, \dots, N_p). \quad (1)$$

ここで、 c はプロジェクタ中心、 s_i は各スポットの勾配である。 N_p は投影スポットの総数である。 δ は媒介変数を表す。また、撮像系に関する幾何拘束は式 (2) で示される。

$$P \tilde{M}_i = \omega \tilde{m}_i. \quad (2)$$

同式は、スポット i の空間点 $\tilde{M}_i = [M_i^t, 1]^t$ が、透視投影行列 P と画像点 $\tilde{m}_i = [m_i^t, 1]^t$ の積で表されることを示している。なお、 ω は 0 でない定数である。

このような原理の計測を適用する際、 c 、 s_i 、 P が既知のパラメータであり、 m_i が観測データである。このため、上記の二式から、空間点 M_i が計算できることが分かる。

3.3 多点瞬時解析高速ビジョン

前節の原理に基づき、画像から三次元情報を演算する際、入力画像から多数スポットの位置情報を抽出する過程が時間を要する。これに伴う全体の性能低下を回避し、リアルタイム三次元センシングを実現するために、本論文では新たに多点瞬時解析高速ビジョンを導入した。

ここでは、高速な視覚と処理機能を有するシステムを高速ビジョンと呼んでいる。これまでにも、フレームレートが kfps レベルの高速ビジョンについて、関連する事例が報告されている。例えば、センサに処理機能を搭載したビジョンチップ [9] [10]、列並列に画像伝送を行う Column Parallel Vision (CPV) [11]、

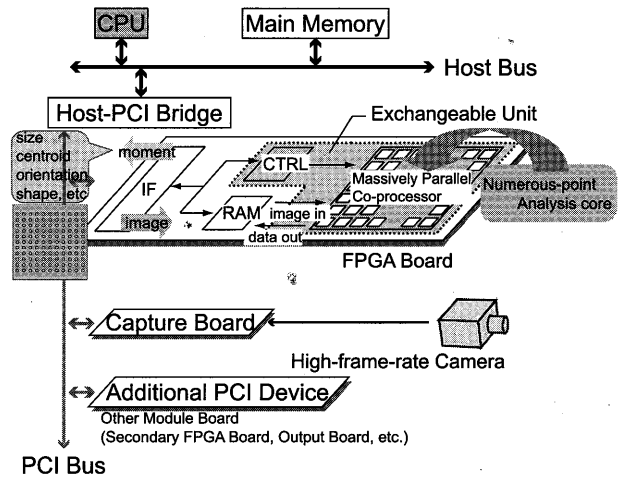


Fig. 3 High-speed vision system with a co-processor for numerous-point analysis

特定の狭小領域のみを転送するもの [12] [13] などがある。これらを利用し、ロボットのマニピュレーションタスク [14] [15]、顕微鏡下のアプリケーション [16]、運動計測 [17]、ステレオトラッキング [18] などのリアルタイムアプリケーションが展開されている。一方、これらのシステムは、画像伝送のオーバーヘッドを回避し、高フレームレート化を図ったものであるが、処理モジュールに関しては多様な処理に対して一定の高速化を提供するアーキテクチャを構成することができていない。

このような問題に対して、視覚情報処理の中でも画像を扱う過程のためのモジュールを分離し、専用コプロセッサとして備える構成がビジョンシステムとして有効であると考えられる。ここでの専用化は、計算量を最小化する超並列構造、プロセッシングエレメント同士の最適な結合方式、エレメント回路の最小構成を要件とする設計を目指すものである。さらに、コプロセッサの交換搭載可能な形式を確保し、性能とともに機能性を広げることも運用性の面で有用性が高い。このようなコンセプトに基づく高速ビジョンを PC ベースで構築した [19]。全体構成を Fig. 3 に示す。

今回、交換搭載するコプロセッサの実装のために、回路の書き換えが可能な Field Programmable Gate Array (FPGA) を利用した。これまでに、ロボットビジョンに有用なアルゴリズムを同デバイスへ論理実装し、カメラと直結したシステムによって、高速化を図った事例も報告されている [20]。今回のように、ボトルネックとなる任意の手続きを高速化するために、メインプロセッサとは別の専用コプロセッサとして設ける場合にも同デバイスは有効であると考えられる。本システムでは、三菱電機エンジニアリング製の FPGA ボード KAC-02A を利用した。同ボードは、Xilinx 製 XC2V6000 を二基搭載している。

また、PC として、Dell Precision 670 を利用した。同 PC は、メインプロセッサとして Intel Xeon 2.80 [GHz] を搭載している。コプロセッサは、64 [bit]/66 [MHz] の PCI バスに拡張搭載した。

さらに、高フレームレートカメラとして、Dalsa 製 CA-D6 を採用した。同カメラの解像度は 256 × 256、各画素のデータ

は 8 [bit], フレームレートは 955 [fps] である. このようなビデオレートをはるかに超えるフレームレートは, 並列 A/D 変換の導入, 画像伝送の差動方式化によって, 近年新たに可能となった. 例えば, 352×288 , フレームレート 10 [kfps] のセンサも研究事例として報告されている [21].

このような超並列プロセッサ交換搭載型の高速度ビジョンシステムに, 多点解析プロセッサコアを搭載した. 同コアは, 画面内の多数領域の画像モーメントを演算し, 個々のサイズ, 位置, 傾き, 形状などを高速に抽出するものである. 画像モーメントは, 領域の幾何的な特徴取得や画像認識におけるモデル照合においても広く用いられている利用価値の高い特徴量である [22]. このような処理は, 画素単位の逐次演算を適用した場合, 入力画像サイズ $N \times N$ に比例するパターンからの領域切り出しと, 対象数 n に比例する画像モーメント演算を伴う. これに対して, 今回搭載したコアが有するアーキテクチャは, 超並列構造やパイプライン化によって, 全体の処理を $O(\sqrt{n})$ 程度の計算量にまで短縮し, 1 [kfps] で 1,000 個以上の対象を解析することができる [23].

以上のシステムと専用プロセッサで構成される多点瞬時解析高速ビジョンによって, 多数スポットの画像位置を高フレームレートイメージングと同期してリアルタイムに取得することができる. 次章では, 画像位置から三次元位置を計算するアルゴリズムについて述べる.

4. 多点解析に基づく三次元センシングのアルゴリズム

本章では, スポットの画像位置 m_i から三次元位置 M_i を演算するためのアルゴリズムを述べる. 提案するアルゴリズムは, 空間パターンの時系列変化を利用し, 多点の高密度なスポットパターンにおいても三次元センシングを正確に遂行できるものとなっている.

Fig. 4 にアルゴリズムの流れを示す. また, 各ステップの詳細を下記に示す. さらに, 前章までに述べたビジョンシステムへ本アルゴリズムを実装した場合の処理性能を合わせて示す.

4.1 補正手続き

本節では, カメラとそれぞれのスポットの位置関係を事前に決定する手法について述べる. Fig. 4 の Calibration が以下の手続きに相当する. 今回の三次元センシングでは, 式 (3) に基づき, 三次元情報を取得するものとした.

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^i(z_w) \\ f_2^i(z_w) \\ f_3^i(X_v) \end{bmatrix} \quad (3)$$

補正手続きでは, 式中の三つの射影関数 f_1^i , f_2^i , f_3^i を決定する. このように射影関数を直接求めることで, 内部パラメータ c , s_i , および P を求める必要がなくなり, 簡便である.

関数 f_1^i , f_2^i は, スポット i の奥行き距離 z_w 座標から, それぞれ空間点の x_w , y_w 座標を求める. これらの関係は, 各スポットがプロジェクタからの直線上に位置することから, 式 (4) のように線形的に記述される.

$$f_j^i(z_w) = \alpha_{j,1}^{(i)} z_w + \alpha_{j,0}^{(i)} \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

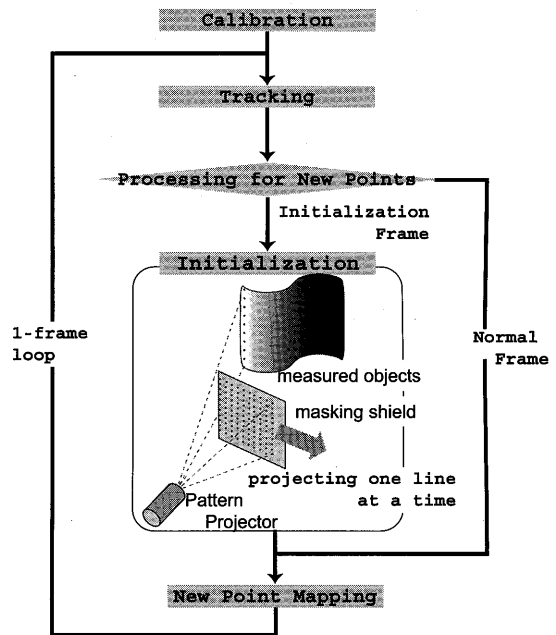


Fig. 4 Operation flow

関数 f_3^i は, 画像点の X_v 座標から奥行き距離 z_w を求めるものである. 正確には, 同関数は X_v と Y_v に関する双曲線関数として記述されるが, フィッティングによって関数を導出することは誤差の観点からも精度が低い. これに対して, 狭い範囲では式 (5) のように, 多項式記述によって, 正確に近似することもできる.

$$f_3^i(X_v) = \sum_{k=1}^n \alpha_{3,n}^{(i)} X_v^k \quad (5)$$

本論文の実験では, それぞれのスポットに対して, 二次の多項式近似によって f_3^i を決定した. また, それぞれの射影関数は, $x_w y_w$ 平面に対するスポットパターンを異なる既知の奥行き距離 z_w について複数枚取得し, 得られた空間点 M_i と画像点 m_i のペアから決定した.

4.2 初期フレームでの手続き

計測データの計算において, 処理システムは, 画像中のどの点か, どの投影スポットに一致するものであるのかを決定する必要がある. これに関して, 本アルゴリズムは高フレームレート観測の下, 一時刻前のフレームにおける情報を利用し, 4.3 節で後述される手法によって対応づけを行う. これは, スポットパターンの画像上の変化に応じて, 探索範囲を動的に変更していくことを簡易に実施するものとなっている. これによって, 演算の効率化が図られるとともに, 測定範囲の制限が対象の時間変化に対してのみ設けられることが本手法の利点である. 一方, 一時刻前の情報がない初期の観測フレームにおいては, 別の手法を組み込む必要がある. Fig. 4 の Initialization が以下の手続きに相当する.

例えば, 直接的な手法として, 全スポットの一斉投影や, 観測対象の動きの停止が考えられる. しかし, 今回のように, 運動中の対象に対して, リアルタイムセンシングをシームレスに開始することを目的とする場合は, 伴う制約が大きいため

これらの手法は望ましくない。そこで、本手法では、式 (6) に従い、スポット i ごとに投影される時刻 $t(i)$ を制御する。

$$t(i) = T_\delta \quad (i \in A_\delta : \delta = 1, \dots, N_e) \quad (6)$$

ここでの集合 A_δ は、測定範囲において互いに同じ画像点に位置することがないスポットで構成されるものである。これはスポット i に関する画像上の移動を特定する拘束線 $l_i(Y_v = l_i(X_v))$ が互いに交わらないことを意味している。このような拘束線 l_i は、エピソード線と呼ばれる [24]。これによって、撮像された画像点にスポットが一意に割り当てられる。また、 N_e は分離された集合の数である。

Fig. 4 では、具体例として、スポットパターンで同じ列に属するものを同一の集合とした場合の初期化の手法を示している。投影されたスポットから順次、次節で述べる時系列フレーム処理へ移行されるため、計測開始時点からデータの欠如が起こることがない点も本手法の利点である。

4.3 連続フレームでの継続的手続き

本節では、初期フレーム以降において適用される手続きについて述べる。初期フレーム以降は入力画像のみを用いて、三次元情報が計測される。Fig. 5 に入力画像の模式図と対応する処理を示す。

まず、計測される運動に対して、フレームレートが高い場合、滑らかな対象表面に投影されたスポットのフレーム間の移動量は小さくなるのが仮定できる。この仮定の下で、Fig. 5 の右側に示されるように、時刻 t の画像点 $m(t)$ に対応する時刻 $t-1$ の画像点 $m_i(t-1)$ を近傍範囲から探索し、スポット i の画像点として対応をとる。同手続きは、式 (7) の評価値 E_{trk} に基づく近傍探索として記述される。

$$E_{trk} = \min\{|m_i(t-1) - m(t)| + |M_i(t-1) - M_i(t)|\} \quad (7)$$

今回の実装では、このような二次元面上の近傍探索を、バケット法 [25] と呼ばれるアルゴリズムによって記述した。同アルゴリズムは、データの全探索を行う代わりに、探索領域全体を格子状に分割し、近傍部分にのみ探索を行うものである。今回の画像のように、解析点が二次元面上で一様に分布し、各格子内に含まれる点数がほぼ同一である場合、このようなアルゴリズムの利用によって、処理量を探索点数に線形にでき、処理の効率化を図ることができる。Fig. 4 の Tracking が以上の手続きに相当する。

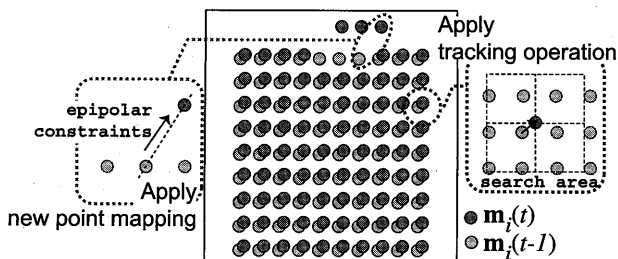


Fig. 5 Input image and corresponding operations to each spot

一方、Fig. 5 に示されるように、画像点の中にはフレーム間で不連続に移動するものもある。これは、計測されるスポットが、対象物体と投影スポットの載る直線の接点にある場合に起こる。このような画像点 $m(t)$ に対応するスポット i の割当に関しては、Fig. 5 の左側に示されるように、エピソード線 l_i を利用した式 (8) の評価値に従い、探索を行うことで対処する。

$$E_{new} = \min\{|Y_v(t) - l_i(X_v(t))|\} \quad (8)$$

ただし、互いに交差するエピソード線を有する複数のスポットが不連続に動いた場合は、対応問題を一意に解くことができない。そのため、フレーム間で対象物体が計測領域で動く速度をあらかじめ制限し、本手続きの正常動作を保証した。なお、同手続きは上記のトラッキング手続きに比べて、約二倍程度の処理時間を要する。しかし、不連続に移動するスポット数は全体に比べて少ない。この点から、トラッキング手続きの採用による処理の効率化が可能となっている。Fig. 4 の New Mapping Point が以上の手続きに相当する。

4.4 三次元センシングにおけるシステム性能

本節では、以上のアルゴリズムを実装し、三次元センシングを実行した場合の速度性能について述べる。システムのタイミングチャートを Fig. 6 に示す。実行処理は、画像の撮像 (Ex)、キャプチャボードへの画像転送 (R1)、ホストメモリへの画像格納 (R2)、画像処理 (Im)、三次元情報の演算 (Sh) の五段階からなる。

画像処理は、メイン CPU でのグレースケール画像 (65,536 [byte]) から二値画像 (8,192 [byte]) への変換 (Pre-processing)、コプロセッサへの画像転送 (I1/I2)、コプロセッサでの処理 (P1/P2)、演算された画像モーメントのメインメモリへの転送 (D1/D2) からなる。ビジョンシステムは、64×64 画素並列のコプロセッサを二基搭載している。256×256 の入力画像は 256×128 に分割され、それぞれのコプロセッサに転送される。今回、それぞれのコプロセッサは、512 対象の二次までの画像モーメントを演算した。このため、画面全体から合計で 1,024 対象の二次までの画像モーメントを取得できる。この際、動作周波数 50 [MHz] で駆動した結果、約 130 [μs] を要した。なお、二次の画像モーメントは三次元情報の演算時には利用しない。また、多点解析における対象数や画像モーメントの次元は同一の回路で変更することができる。さらに、コアの処理時間には、動作周波数の向上、パイプライン化の余地があり、二倍程度の向上が可能である。三次元情報の演算では、コプロセッサから転送されたデータを用い、4.2 節と 4.3 節で述

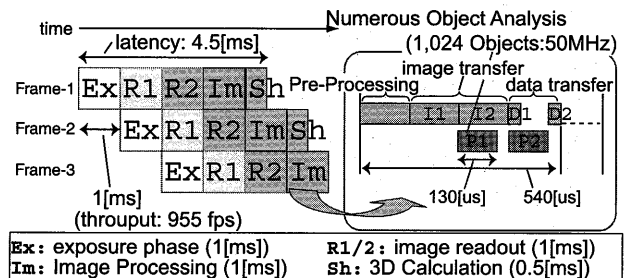


Fig. 6 Timing chart in system operation

べた手法がメイン CPU で実行される。

五段階の各処理の遅延は、タイミングチャートに示されるように、1 [ms] 以内に収まった。このことから、構築したシステムにおいて、スループット 955 [Hz]、レイテンシ 4.5 [ms] で運動／変形物体の三次元センシングが可能であることが分かる。これは、実用的な応用展開において十分な性能を有していると考えられる。なお、レイテンシに関しては、画像転送におけるバッファリング方式の回避や、上述のコプロセッサ動作における改善によって最大 3[ms] までの向上が可能である。

5. 実験

5.1 実験環境

本節では、実験環境のセットアップについて述べる。Fig. 7 に今回の環境の写真を示す。本実験では、マルチスポットパターンプロジェクタとして、StockYale 製 SNF-533X (33 × 33 dots, line pitch 0.45 [deg]) を利用した。

今回のセットアップでは、 $x_w y_w$ 面は設置面に垂直である。補正手続きの完了後、 z_w 軸に垂直な複数の平面を計測した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) は、 $z_w = -60, 0, 40$ [mm] に平面を設置した場合に計測された空間点をプロットしたものである。また、本実験の測定範囲も同図に示している。画像面と測定範囲の中心は、約 400 [mm] 離れている。なお、測定範囲が狭いが、このセットアップ条件はあくまで一例であり、本システムの限界ではない。Fig. 8(b) は、計測された全スポットの奥行き距離 z_w の平均と分散を各平面に関してプロットしたものである。この図から、今回の実験環境では各計測点の精度に関して、mm 程度が実現できていることが分かる。また、実験条件として、各投影スポットのフレーム間許容速度は、50 [mm/frame] (50 [mm/ms]) であるとした。

次節以降では、高速に揺れる旗 (非剛体の高速変形)、飛来するボール (剛体の運動)、運動する手の三つの異なる対象物体に対して三次元センシングを適用した実験結果を示す。これらの動きは高速であり、従来のシステムによって三次元情報を取得することは困難であったと考えられる。

5.2 高速変形する旗に対する三次元センシング

本実験では、伸縮性のある布地の一端を固定し、旗として利用した。固定した軸の側面から送風機によって、風を当てた。この

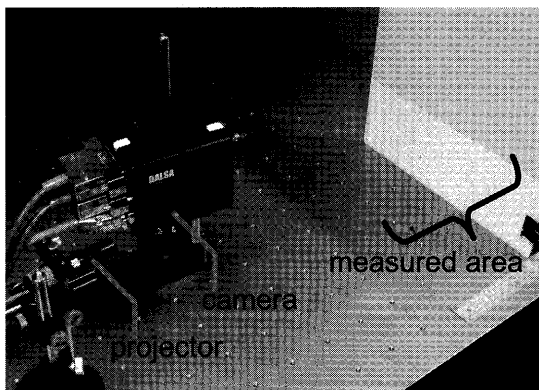
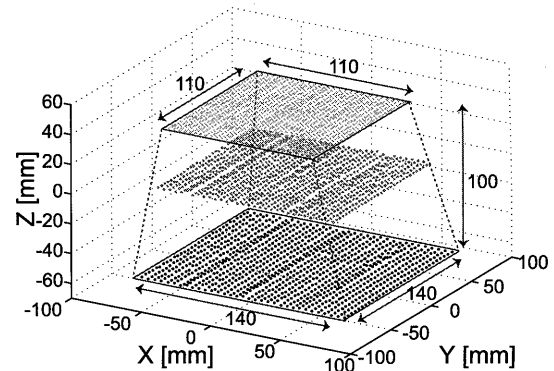


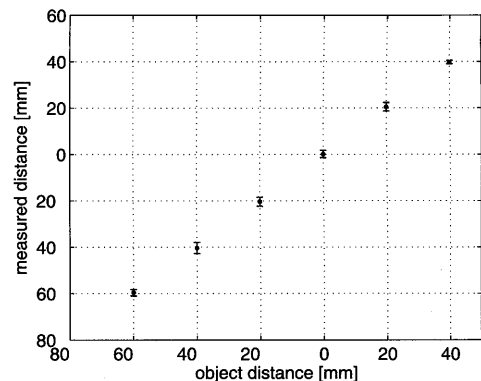
Fig. 7 Experimental setup

ような設定の下、空気流体中で高速振動している旗を対象物体とした。旗のサイズは、約 150 [mm] × 約 150 [mm] である。旗の写真を図 9 (a) に示す。また、撮像された画像を図 9 (b) に示す。初期フレームの処理では、4.2 節で示したように、変形している旗に対して、スポットを一つずつ入射した。

Fig. 10 に振動する旗の計測結果を時系列に示す。図は 20 [ms] ごとの結果を表示している。プロットされた点は計測されたスポットの三次元位置を示している。また、計測結果から推定される表面をあわせて図に示した。計測結果から、システムが高速流体中の非剛体物体の変形を正確にとらえていることが確認できた。これは高速変形／振動する非剛体のセンシング可能性が十分に高いことを示しており、医療支援や検査などへの展開が期待できると考えられる。

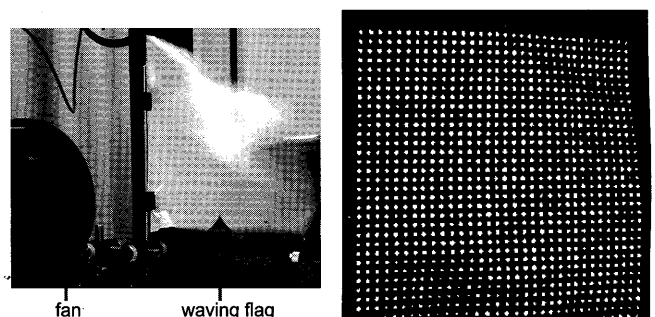


(a) Measured result



(b) Error evaluation

Fig. 8 Measurement results for planes



(a) Picture

(b) Captured image

Fig. 9 Measured flag

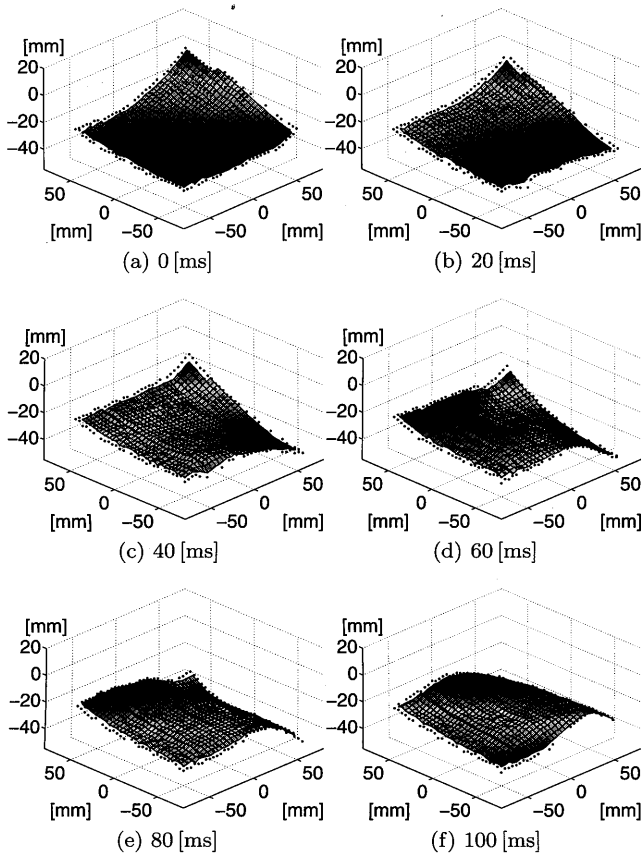


Fig. 10 Sequential measurement results of waving flag

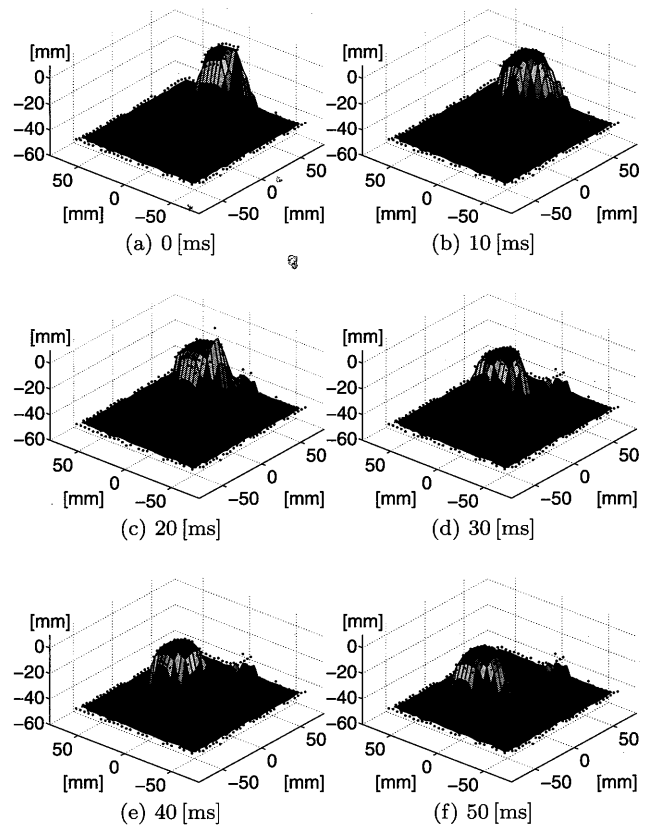
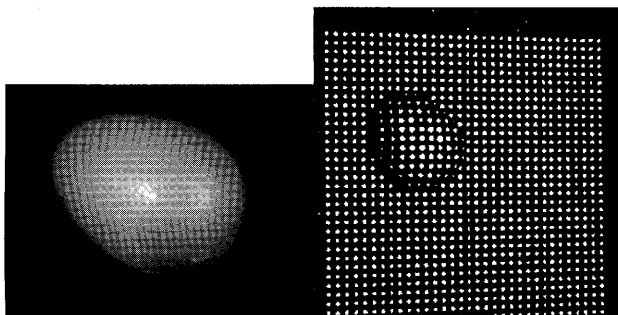
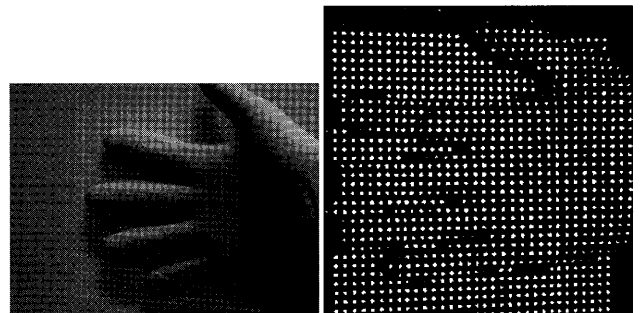


Fig. 12 Time-sequential results for flying ball



(a) Photograph (b) Captured image

Fig. 11 Measured ball



(a) Photograph (b) Captured image

Fig. 13 Measured hand

5.3 飛来するボールに対する三次元センシング

本実験では、運動する剛体を対象物体とした。ここでは、卵状のボールを利用した。同ボールは回転楕円体で近似され、その長径は約 48 [mm]、短径は約 40 [mm] である。写真を Fig. 11 (a) に示す。また、参照面として、Fig. 7 にも示されている平面を計測領域の後ろに設置した。このようなセットアップの下、計測領域へ物体を投げ入れ、飛来中のボールの三次元センシングを行った。撮像された画像を Fig. 11 (b) に示す。

計測結果を Fig. 12 に示す。図は 10 [ms] ごとの結果を示している。ボールの運動とともに、その形状と運動情報が正しく取得できていることが分かる。本実験における形状は比較的単純であるが、複雑な形状物体への適用可能性も十分に高い。このような剛体運動のリアルタイム三次元センシングは、特に口

ポティクスにおける動的なマニピュレーションタスクにおいて利用価値が高いと考えられる。

5.4 ジェスチャを行う手に対する三次元センシング

本実験では、人間の手を対象物体とした。ここでは、計測領域へ開いた手が侵入し、その後閉じるという一連の動作をとらえた。開いた状態の手の全体サイズは、200 [mm] × 200 [mm] × 50 [mm] の直方体に収まる程度である。Fig. 13 (a) に、計測された手の写真を示す。また、撮像された画像を Fig. 13 (b) に示す。

Fig. 14 に計測結果を示す。図は 20 [ms] ごとの結果を示している。上記で述べた動作がその形状変化とともに、正確にとらえられていることが分かる。画像を用いたマンマシンインターフェースでは、二次元パターンのみで認識を遂行することが主であったが、このような結果から三次元情報も利用できること

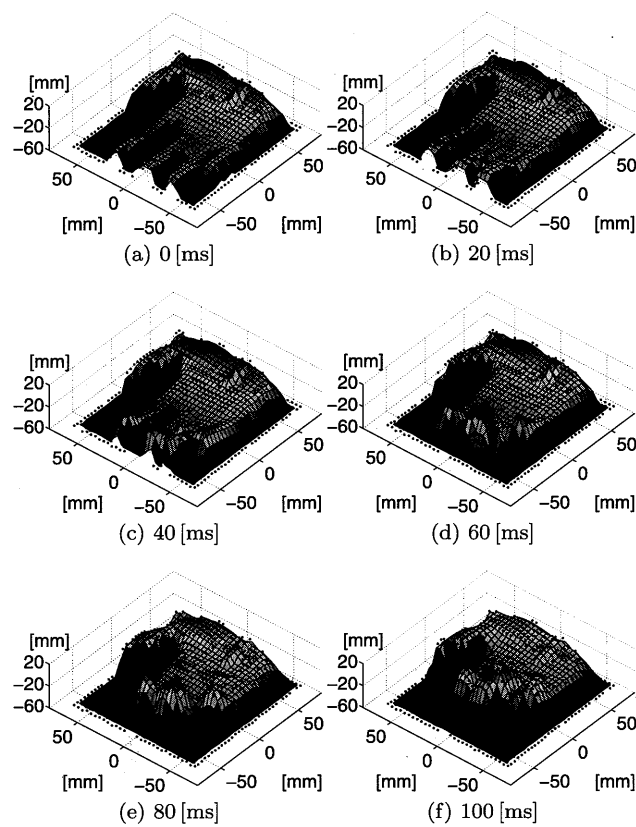


Fig. 14 Time-sequential results for moving hand

が分かる。これは、精度と柔軟性が高いアプリケーションの構築に向けて、極めて強力なアプローチの提供につながると考えられる。

6. ま と め

本論文では、高フレームレートリアルタイム三次元センシングについて述べた。本三次元センシングでは、リアルタイムアプリケーションのニーズに対応し、(1) 運動中の物体の計測保証、(2) 高い計測速度の二つに焦点を置いた。これを実現するために、マルチスポットパターンに基づく単一画像での計測と、多点瞬時解析高速ビジョンによる高フレームレートイメージングと高速視覚情報処理を統合したシステムを新たに構築した。結果として、スループット 955 [Hz]、レイテンシ 4.5 [ms] の三次元センシングを実現することができた。また、三つの異なる対象物体に対して評価実験を行い、計測が正確に遂行できていることを確認した。

このタイプのリアルタイム三次元センシングシステムは、ロボットマニピュレーション、マンマシンインターフェース、検査などの産業応用、医療支援などの応用分野において役立つ見込みが非常に高い。今回は、リアルタイム三次元センシングのコンセプトの提案と、速度性能に重点を置いたシステム構築を行った。次の展開として、具体的なアプリケーションの開発と並行し、精度の向上に関してその余地を埋めていく必要がある。特に、パターンを対象に応じて変化させる能動的パターン照射の導入、照射パターンの高密度化、レンジマップ同士の時系列

統合などが発展的な要素として考えられる。

参 考 文 献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [2] F. Chen, G.M. Brown and M. Song: "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Journal of Optical Engineering*, vol.39, no.1, pp.10-22, 2000.
- [3] 石川正俊: "超高速ビジョンの展望", *日本ロボット学会誌*, vol.23, no.3, pp.274-277, 2005.
- [4] R. Ginhoux, J.A. Gangloff, M.F. de Mathelin, L. Soler, M.M.A. Sanchez and J. Marescaux: "Beating heart tracking in robotic surgery using 500 [Hz] visual servoing, model predictive control and an adaptive observer," *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.274-279, 2004.
- [5] 中村仁彦, 岸宏亮, 岡田昌史: "高速度カメラを用いた心拍動同期とそれを用いた心臓外科手術支援ロボットシステム", *日本ロボット学会誌*, vol.21, no.4, pp.451-459, 2003.
- [6] 林部充宏, 鈴木直樹, 小林進, 中田典生, 服部麻木, 鈴木薫之, 大竹義人, 中村仁彦: "幾何学パターン投影法による術中変形を伴う生体の形状計測法の開発", *電子情報通信学会論文誌 D*, vol.J88-D2, no.1, pp.133-141, 2005.
- [7] P. Fong and F. Buron: "High-resolution three dimensional sensing of fast deforming objects," *Proceedings of International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp.1606-1611, 2005.
- [8] K. Umeda: "A compact range image sensor suitable for robots," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp.3167-3172, 2004.
- [9] A. Moini: *VISION CHIPS*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [10] T. Komuro, S. Kagami and M. Ishikawa: "New architecture of programmable digital vision chip," *Proceedings of 2002 Symposium on VLSI circuits*, pp.266-269, 2002.
- [11] Y. Nakabo, M. Ishikawa, H. Toyoda and S. Mizuno: "1ms column parallel vision system and its application of high speed target tracking," *Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.650-655, 2000.
- [12] I. Ishii, K. Kato, S. Kurozumi, H. Nagai, A. Numata and K. Tajima: "Development of a mega-pixel and milli-second vision system using intelligent pixel selection," *Proceedings of 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation*, pp.9-10, 2004.
- [13] U. Muehlmann, M. Ribo, P. Lang and A. Pinz: "A new high speed CMOS camera for real-time tracking applications," *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.5195-5200, 2004.
- [14] T. Senoo, A. Namiki and M. Ishikawa: "Ball control in high-speed batting motion using hybrid trajectory generator," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp.1762-1767, 2006.
- [15] N. Furukawa, A. Namiki, T. Senoo and M. Ishikawa: "Dynamic regrasping using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp.181-187, 2006.
- [16] N. Ogawa, H. Oku, K. Hashimoto and M. Ishikawa: "Micro-robotic visual control of motile cells using high-speed tracking system," *IEEE Transactions of Robotics*, vol.21, no.4, pp.704-712, 2005.
- [17] Y. Watanabe, T. Komuro, S. Kagami and M. Ishikawa: "Multi-target tracking using a vision chip and its applications to real-time visual measurement," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.17, no.2, pp.121-129, 2005.
- [18] 石井抱, 田中静一: "高速視覚を用いた実時間三次元追跡システム", *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol.J88-D-II, no.12, pp.2331-2340, 2005.
- [19] 渡辺義浩, 小室孝, 鏡慎吾, 石川正俊: "超並列プロセッサ IP を用

いたリコンフィギャラブル高速ビジョンシステムの構築と評価”, 情報科学技術レターズ, vol.5, pp.25-28, 2006.

- [20] 平井慎一, 座光寺正和, 増渕章洋, 坪井辰彦: “FPGA ベースリアルタイムビジョン”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.7, pp.873-880, 2004.
- [21] S. Kleinfelder, S. Lim, X. Liu and A.E. Gamal: “A 10000 frames/s CMOS digital pixel sensor,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.36, no.12, pp.2049-2058, 2001.
- [22] R.J. Prokop and A.P. Reeves: “A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition,”

Graphical Models and Image Processing, vol.54, no.5, pp.438-460, 1992.

- [23] Y. Watanabe, T. Komuro, S. Kagami and M. Ishikawa: “Parallel extraction architecture for information of numerous particles in real-time image measurement,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.17, no.4, pp.420-427, 2005.
- [24] O. Faugeras: Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint (Artificial Intelligence). MIT Press, 1993.
- [25] R. Sedgewick: Algorithms in C++. Addison Wesley Professional, 1999.



渡辺義浩 (Yoshihiro Watanabe)

1979年12月18日生。2007年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。2004~2007年日本学術振興会特別研究員。2007年東京大学リサーチフェロー。高速ビジョン, 超並列プロセッサ, 実時間画像計測等に関する研究に従事。博士(情報理工学)。(日本ロボット学会正会員)



小室 孝 (Takashi Komuro)

1972年12月8日生。2001年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。同年科学技術振興事業団研究員。2002年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助手, 2005年講師。高速ビジョン, 画像プロセッサ等に関する研究に従事。博士(工学)。



石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1954年8月22日生。1977年東京大学工学部計数工学科卒業。1979年東京大学大学院修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所に入所。1989年東京大学工学部計数工学科助教授。現在, 東京大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002, 2003年度東京大学総長特任補佐, 2004, 2005年度東京大学副学長。超並列・超高速ビジョン, センサフュージョン, メタパーセプション等に関する研究に従事。1998, 2001年度本学会論文賞受賞。工博。(日本ロボット学会正会員)