

正射投影イメージスキャナ OrthoScan-1000 の開発

アーカイブに適した撮像装置の提案

アイメジャー株式会社

— 瀬 修 —

このたび、高さ1メートル、幅50cm、奥行き25cmの正立した立体物について、全域に焦点が合致し、かつ正射投影(オルソ)画像を得られるイメージスキャナ方式の撮像装置『OrthoScan-1000』を開発した。フルスペックでは、1億2千万画素の画像を生成する。今回の開発のターゲットは、埋蔵文化財発掘調査を行った際に作成される発掘調査報告書における土器等の実測図と呼ばれる図面を作成する作業のワークフロー変革であった。しかし、「階調性、解像度、寸法の3条件を満たす高品質な正射投影(オルソ)画像」を生成する装置の需要は多岐にわたると思われ、デジタルアーカイブをはじめとして多方面への利用が期待される。本稿では、高品質な画像とは何かという点に言及した上で、製品の解説を行う。

1. はじめに

埋蔵文化財の記録保存という理念から、遺跡の発掘調査を行った場合、調査主体には必ず発掘調査報告書を刊行する義務が、文化財保護法によって定められている。発掘調査報告書に掲載する土器等の図面は実測図と呼ばれ、正射投影で見た図面である必要がある。

従来は、三角定規等を使って、手実測にて土器の形状を方眼紙に転写していた。もし、カメラで写真を撮るような簡単な方法で、正射投影画像をデジタル画像として得ることができれば、画像を直接トレースすることで実測図を作成することが可能となる。しかしながら、通常のカメラ撮影で得られる画像は中心投影画像となり、計測には適さない。そこで、正射投影画像を得る手法の開発が期待された。

図1は、中心投影と正射投影の模式図である。正射投影にて生成される立体物の2次元画像は、寸法情報を保持することが分かる。図2は、格子状パターンを巻き付けた円筒形状の対象物を中心投影で撮影した場合と、正射投影で撮影した場合の比較画像である。

近年、コンピュータの処理能力の向上、低価格化と画像処理ソフトウェアの革新により、三次元画像データ(以下、3-Dデータと呼ぶ)を作成する手法が開発されている。一度、対象物の3-Dデータを作成することができれば、生成されたワイヤーフレームとその表面に貼り付けるテクスチャマッピングにより、対象物を任意の方向か



図1 中心投影と正射投影の模式図

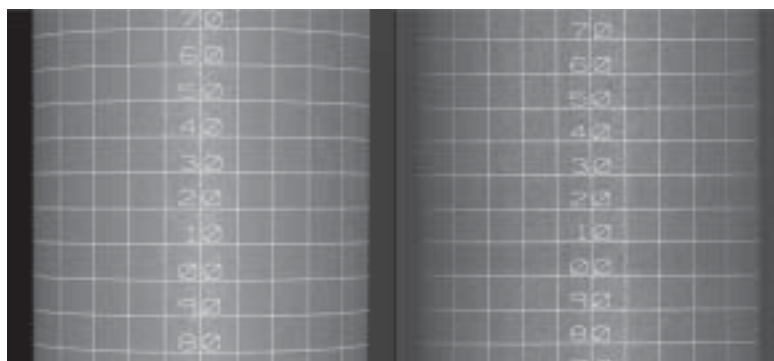


図2 格子状パターンを貼った円筒サンプルを撮像した例

ら眺めることが可能となる。また、任意の方向から見た正射投影画像を出力することも可能となる。しかしながら、3-Dデータを生成するためには、方式によっては、複数の撮影画像の中の対応点を指示するなどの特殊技能が作業者に求められる。また、解像度を上げる程、画素数が増加し、処理時間は幾何級数的に増加する。そのため、遺跡から出土される遺物の中の代表的な土器数点程度の3-D作成であるならばまだしも、細かな石器等も含めた遺物全てを余すことなく処理する記録手法としては限界がある。

また実測図には、土器表面の文様な

どの「線」を記録として書き込む必要がある。その線は、「当時の作者がどのような手法や手順で作成した結果生まれたのか」を報告書の読者に伝える役割をもち、実測図の肝である。従来は、対象物を手に取り、凝視しながらこの線を解読抽出する作業を行っていた。もし、画像の品質が十分に高ければ、ディスプレイや印刷された画像を直接トレースすることで、実測図を作成することが可能となる。

では、ここで要求される高品質な画像とは何だろうか。画像の作成法においては、得られる画像の再現性(=反復精度)や、撮影者の技量依存の無き

ことが期待される。すなわち「何度撮
でも」、「誰でも」同じ画像を得られる
ことが重要である。

対象物のみかけの明るさは、照明光
量の強度と対象物の反射率、並びに表
面の性状（光沢度など）に依存する。
結像光学系や撮影アングルを固定した
場合、画像データの再現性の障害は、
照明条件の違いが主要因となる。そこ
でまず、照明を能動的に行うために、
撮像システムは照明装置を搭載してい
る必要がある。更に、照明光量の強弱、
照明の不均一性、レンズの周辺減光
（コサイン4乗則）などの撮影システ
ム固有の再現性の障害を取り除くため
には、対象物の反射率を得るしくみが
必要となる。もしくは、反射率に準じ
た濃淡画像を得る必要がある。また、
濃淡を表現する階調は最低でも8 bit
（256階調）が必要である。

次に、画像は観察に耐えるきめ細か
な空間分解能を保持する必要がある。
至近距離から肉眼にて対象物をまじま
じと観察する場合、視力1.0の人は、
300mmの距離にて、87 μ m（解像
度にして、291ppi=pixel per inch）
分解する。このことから最低でも、300
ppi以上の解像度が必要である。更に、
凝視に堪えられる画像としては、
600ppi以上の空間分解能があれば十分
である。

以上をまとめると、画像を直接ト
レースする方法で実測図を作成するた
めに、次の3つの要件を満たす撮像装
置が求められた。

1. 正射投影画像を出力すること
2. 照明装置を内蔵し、対象物表面
の反射率に準じた8bit以上の濃
淡画像を得られること
3. 対象物全体を撮像し、かつ300
ppi以上の解像度を有すること

なお、本稿では、断りの無い限り画
像という言葉で階調（濃淡）情報を有
する画素(pixel)の2次元配列から構成
されるデジタル画像に限定して用い
る。また、本稿では波長毎の反射率、す
なわち対象物の色情報には言及せず、
白黒濃淡画像（グレースケール）のみ
を扱う。自然発光しない対象物におい
ては、色情報とは各波長毎の反射率で
あり、本稿は色情報についてのデジタ
ルアーカイブを議論する上でも基礎的
な検討になると考える。

2. 製品構成

2-1. 製品仕様

本製品の対象物側から見た外観図を
図3に示した。また、表1に製品仕様
を示した。製品仕様中、斜体下線部に
関連する技術を次節以降に詳説する。

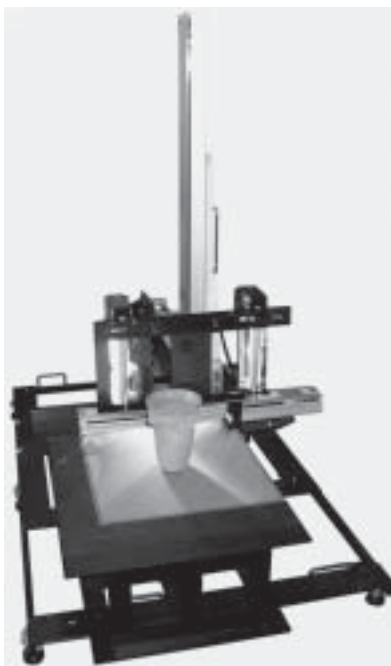
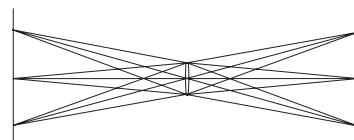


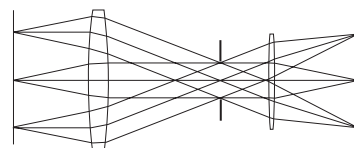
図3 製品の的外観

2-2. テレセントリック光学系

テレセントリック光学系は、対物レ
ンズの焦点位置に絞り環を持ち、レン
ズ光軸に並行な入射光線のみが結像に
寄与する。その結果、結像は正射投影
画像となる。また、レンズから対象物
までの距離が変化した場合でも、撮像
される画像の大きさ変化がない（デ
フォーカスにより倍率が変化しない）
という特徴を有する。テレセントリッ
ク光学系は、計測に適した結像系であ
り、半導体製造装置の露光光学系など
に採用されている。図4は、通常の光
学系と、テレセントリック光学系の光
路図の1例である。



(a) 通常の光学系



(b) テレセントリック光学系
図4 通常の光学系と

表1 OrthoScan-1000製品仕様

項目	値	単位	備考
取込み寸法: H(Y) x W(X) x D(Z)	1000 x 500 x 250	mm	10 pixel/mm(254ppi)にて
	1000 x 300 x 250	mm	20 pixel/mm(508ppi)にて
光沢補正:	10	pixel/mm	(254ppi)
	20	pixel/mm	(508ppi)
有効画数: HxW	20000 x 6000(**) (1億2千万)	pixel	10 pixel/mm(254ppi)にて
	10000 x 5000 (5千万)	pixel	20 pixel/mm(508ppi)にて
階調性:	10	bit	(1024階調) ガンマ変換8bit(256階調)出力
出力画像:	正射投影(オクル)画像 8bit BMPファイル		
階調再現性:	シェーディング補正機能 搭載		に基準値対応
画線取り込み時間:	約 5	mSec./line	
	約 20	min.	5千万画素、7レイヤーにて
照明系:	4W ハロゲンランプx2、コールドミラー付き 対物照明強度	8000	異なる照明角度の2灯を搭載 光量可変
結像光学系:	テレセントリック光学系		
	有効画数	160	mm
	有効長	287	mm
	倍率	-0.14	
	開放F値(実効値)	5.34	絞り可変、全開可
センサ系:	7 μ m 5150画素 ラインセンサカメラ ゲイン倍率 x1、x2、x4		
走査系:	アブリュートロータリーエンコー外置 ACサーボモータ駆動直交3軸ステージ 線り返し位置再帰精度	20	μ m
画像処理機能:	バリエーション レイヤースキャン ラインセグメント補正		
装置寸法: HxWxD	1670 x 1250 x 1650	mm	撮像ロボット部のみ
総重量:	約 100	kg	電源 PC、ディスプレイ別
可搬性:	20kg以下のパーツに分解可能		
**キャブチャードの制約から、W(X)方向は最大6000pixelに制約される。 光学解像度 20 pixel/mm(508ppi)の場合、最大取り込み幅(W)=300mmに制約される。			

2 - 3 . バンドスキャン

テレセントリック光学系では、対物レンズの光軸に並行な入射光線のみが結像に寄与する。そのため、撮像する対象物の実寸法と同じ寸法以上のレンズ口径が必要となる。例えば、直径300mmの対物レンズを使った場合、撮像可能な寸法は、内接正方形の辺寸法であり、210mmとなる。つまり、高々A5サイズ程度である。これはレンズ重量と製造コストの両面から実用的でない。

そこで、本製品では、要求仕様である取り込み寸法：H(Y) x W(X) = 1000x500mm を達成するために次に述べる「バンドスキャン」を採用した。

1) 短冊状のテレセントリックレンズとラインセンサからなる撮像ユニットを機械的に走査することで2次元画像を得る。(本稿ではこれをバンド画像と呼ぶ。)

2) 撮像ユニットを高さ(Y軸)方向にジグザグに機械走査することで、バンド画像を接合し、更に大きな2次元画像を得る。

図5は、本製品の照明系、結像光学系、センサ系、走査系である。また、図6は、バンドスキャンの概念図である。

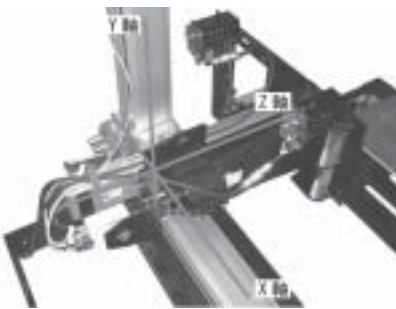


図5 本製品の照明系、結像光学系、センサ系、走査系

本製品で得られるバンド画像の高さは、テレセントリックレンズの有効幅によって制限され、150mmである。1000mmの高さの対象物を撮像する場合には、1000/150=6.67 より、7回バンド画像をスキャンし、接合することで生成される。ここで、得られるバンド画像は、正射投影画像であること

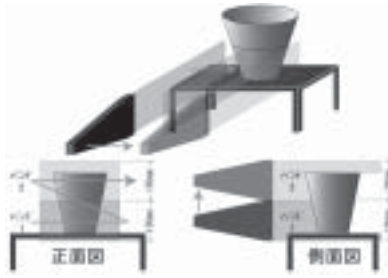


図6 バンドスキャン概念図

から、対象物が立体物であっても、接合可能な画像となる。ちなみに中心投影画像の場合は、同様な手法で立体物のバンド画像を得たとしても、端部では見込み角度が異なるため、画像不整合が発生し、接合できない。

また、次節で述べるシェーディング補正を行うことで、対象物の反射率に準じた濃淡画像を得る。更に、3軸ステージの繰り返し位置再現は20μm(50pixel/mm相当)であり、最大光学解像度(20pixel/mm)に対して十分な精度を持つ。その結果、画像接合に際して、画像不整合は発生せず、拡大縮小などの寸法微調整や、接合部での明暗の微調整といった画像調整も一切不要である。

2 - 4 . イメージスキャナ方式

照明装置を内蔵し、対象物表面の反射率に準じた濃淡画像を得るために、イメージスキャナ方式を搭載した。2次元デジタル画像を得る方法はセンサの種類から大きく3種類に分類される。エリアセンサを用いるカメラ方式、ラインセンサを用いて副走査するイメージスキャナ方式、単一センサを用いてスパイラルスキャン^{3) 4) 5)}方式の3つである。

イメージスキャナ方式は、次の2つの特徴を有する。

1)。「ライン光源+結像系+ラインセンサ」からなる撮像ユニットで1ラインの画像を得て(主走査と呼ぶ)この撮像ユニットをラインセンサ配列とは直角な方向に走査する(副走査と呼ぶ)ことで2次元画像を生成する。そのため、エリアセンサを用いるカメラ方式に較べて、照明条件や、結像条件を制御しやすく安定した品質の画像を

得られる。対象物への照射光入射角度や、対象物からの反射、拡散される光の結像系への取り込み角度を制御できるため、例えば、表面光沢のある対象物を撮像する際には、特に重要である。

2) . シェーディング補正機能

対象物を設置する近傍に、標準反射板として白基準板を持ち、画像取り込みに先立ち白基準板の取り込みを行い、白基準データとする。また、照明光源を消灯もしくは、レンズ前を蓋によって覆うことで、ラインセンサの暗時出力値を得て、黒基準データとする。次式の演算を行うことで、白基準の反射率を基準とした対象物の反射率に比例した濃淡画像を得ることができる。

$$D_{out}(i) = bd * (d_{in}(i) - d_{bk}(i)) / (d_{wt}(i) - d_{bk}(i))$$

$i = 1 \quad 5150$: ラインセンサ画素番号
 $D_{out}(i)$: 補正された出力値
 $bd=1024$ (10bitの場合)
 $d_{in}(i)$: センサからの生出力値
 $d_{bk}(i)$: 黒基準データ
 $d_{wt}(i)$: 白基準データ

シェーディング補正により、次の「固定パターンとしての」明るさ変動要因を校正する。

1) 照明光源の強度、主走査方向での照明ムラ

2) 光学系の明るさ(F値)、主走査方向での周辺減光(コサイン4乗則)

3) ラインセンサの感度、画素毎の感度ムラ

留意点として、これら要因の副走査駆動中での変動は、シェーディング補正であっても補正できない。特に、走査中での照明光源の光量安定性は非常に重要である。

また本装置で撮像する際の対象物上での照度は、約8000 luxであり環境照明の変動の影響を相対的に受けにくい。そのため、撮像に際して暗室等の特殊環境は不要であり、通常照明下で撮像できる。もちろん、強い光照射による対象物の劣化を防ぐために、積極的に照明光源の強度を落とし、低照度にて撮像することも可能である。この場合であっても、シェーディング補正により、照明光源の光量の強弱に依存しない、被写体の反射率に準じた階調画像が再現される。

2 - 5 . レイアースキャン

バンドスキャンを行うことで、高い解像度でデジタル画像を得ることと、大寸法の対象物を撮像することを同時に両立することができた。しかし、高い解像度を得ることのできる結像系においては、ピントの合う範囲(被写界深度)は狭い。本製品における解像度モード:10 pixel /mmでの被写界深度は約20mmである。要求仕様である取り込み寸法は、 $H(Y) \times W(X) \times D(Z) = 1000 \times 500 \times 250 \text{ mm}$ の奥行き方向の立体物に対して遙かに及ばない。

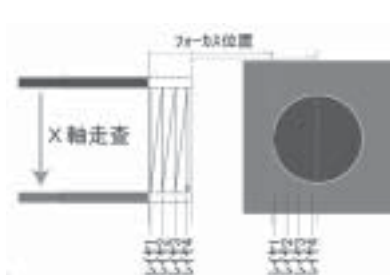
そこで本製品では、全域で焦点の合致した画像を得るために次に述べる「レイアースキャン」を採用した。

1) 対象物の奥行き(Z軸)方向を、レンズの被写界深度の量(depth)でスライス分割する。これを本稿では、レイヤー画像と呼ぶ。

2) バンドスキャンによって、1レイヤー画像を得る。スライス分割した枚数分、対象物の奥行き方向に撮像ユニットを移動させ、レイヤー画像を得る。

3) 複数のレイヤー画像上に存在する、同一画素(pixel)に注目し、奥行き方向について、焦点の合致したレイヤーを検出する。各レイヤー画像は正射投影画像であることから、奥行き方向に倍率変化が無い。そのため各画素について、最も焦点の合致したレイヤー画像を選択し、奥行き方向を縮合することで、奥行き方向に対し全域にて焦点の合致した2次元画像を得ることができる。

以上の作業がソフトウェアにより自動的に行われる。図7はレイアースキャンの概念図である。



(a) 上面図

2 - 6 . ラインセンサ傾き補正

本装置は、可搬性を有し、20 kg以下のパーツに分解可能である。分解、組立の繰り返し再現精度を確保するために次の2つの機能を搭載している。

1) X - Y軸、Y - Z軸ステージ結像位置決めピン

メカ組立再現を確保するために、位置決めピンを搭載している。作業者は、位置決めピンに沿って各軸ステージを結合することで、機械的な再現精度が確保される。

2) ラインセンサ傾き補正

バンドスキャンにおいては、Y軸方向とラインセンサ内のフォトダイオードの配列方向の平行度は、百分の1度以下でなければならない。150mmのレンズ有効幅に対して0.5画素(25 μm)以下の角度精度である。そこで、ラインセンサの取り付け角度を位置決めピンで再現した後に、ソフトウェア処理にて、「剪断的な補正」を行うことで、ラインセンサ傾き補正を行う。この作業は、組立時に1度だけ実施する。図8は、ラインセンサ傾き補正を行うためのソフトウェア画面である。

3 . 応用事例

本製品を使って撮像した土器画像を図9に示す。解像度は、10pixel/mm。下端部には念のために定規を撮し込んでも無くて良い。本製品にて得られるデジタル画像は、一般に使われるイメージスキャナと同様に、画像取得時の解像度情報を保持している。従って、例えばフォトショップなどの画像処理アプリケーションソフトでファイルを開くことで、ディスプレイ上で直接寸法を測定することが可能で

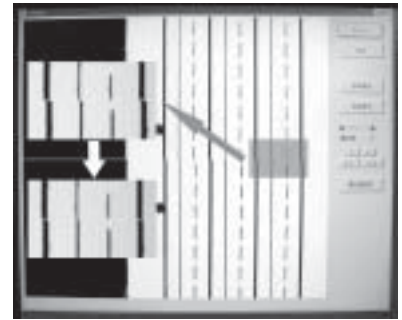


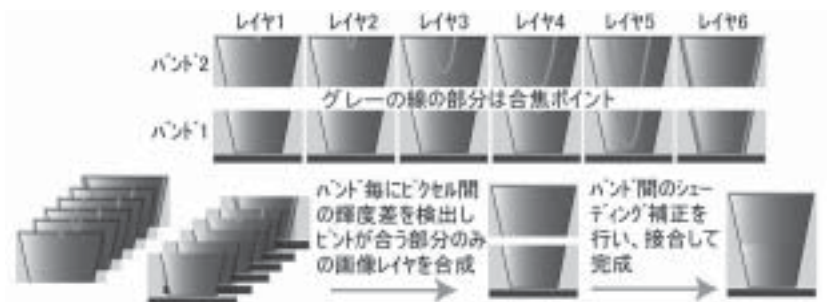
図8 ラインセンサ傾き補正ソフトウェア画面

ある。ちなみに、図9のデジタル画像から、土器の実寸法は、幅160.4mm、高さ210.0mmであることが解る。また、紙への印刷を実行するだけで、等倍印刷が可能となる。図10は、石器の画像である。解像度は、20pixel/mm。なお、掲載した画像中の被写体は土器、及び石器を模造したレプリカを使用した。

4 . むすび

本稿では、埋蔵文化財発掘調査を行った際に作成される発掘調査報告書における土器等の実測図と呼ばれる図面の作成方法について、正射投影で得たデジタル画像を直接トレースする方法を提案した。

また、そのための装置の条件として、1.正射投影画像を出力すること、2.照明装置を内蔵し、対象物表面の反射率に準じた8bit以上の濃淡画像を得られること、3.対象物全体を撮像し300 pp以上の解像度を有すること、の3点が重要であることを明らかにし、これらの仕様を達成する装置の開発を踏まえ、主要機能の技術詳細説明を行った。



(b) 側面図

図7 レイアースキャン概念図



図9 本製品で撮像した土器の画像

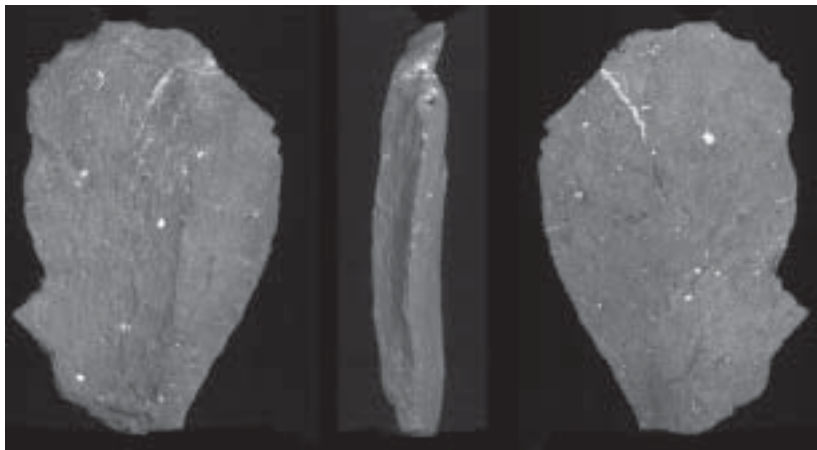


図10 本製品で撮像した石器の画像

今後は、撮像装置のフルカラー画像対応や、対象物の回転角度と撮像タイミングを同期させることで、円筒座標系への投影を行い、展開画像の生成も可能となるだろう。また、遺物等をはじめとする立体物のみに限らず、非接触による寸法計測等が求められる対象物全般や、デジタルアーカイブ等の用途にも、本稿にて提案した正射投影画像の生成方法は有効であると考えられる。

謝辞

本製品は、株式会社シン技術コンサルとの共同開発により完成した。佐藤武彦氏を始めとする同社関係者の方々からは、製品が達成すべき要求仕様の確定、土器を使つての実際の撮像評価など全面的に御指導とご協力を頂いた。また本稿執筆においては、画像や図面をご提供頂いた。

参考文献

- 1) 徐 剛, 写真から作る3次元CG, 近代科学社, (2001)
- 2) 最新 光学技術ハンドブック朝倉書店(2002)
- 3) 松下らカラーイメージスキャナ設計技術、トリケップス(1991)
- 4) 一ノ瀬第47回日本画像学会技術講習会(1999)
- 5) 一ノ瀬赤外線イメージスキャナの開発、画像ラボ, vol.11, No.5(2000)

【著者紹介】

一ノ瀬 修一

(昭和34年12月17日生・埼玉県出身)

アイメジャー有限公司 代表取締役

〒399-0023 長野県松本市内田2941-4

TEL:0263-85-0051

FAX:0263-85-0052

E-Mail:ichinose@imeasure.co.jp

URL : <http://www.imeasure.co.jp>

<主なる業務歴および資格>

1985年、筑波大学理工学研究科物質工学修士課程了。同年、エプソン株式会社へ入社。1986～1999年、カラーイメージスキャナの設計、要素開発、ソフトウェア設計、アルゴリズム開発に従事。1999年、セイコーエプソン株式会社退社。同年、アイメジャー有限公司を設立。