

コンテナクレーン自動化のための画像を用いたコンテナ相対位置測定

非会員 國 光 智 (理化学研究所)

正 員 淺 間 一 (理化学研究所)

正 員 川 端 邦 明 (理化学研究所)

Measurement of Relative Position of Container with Image Processing for Automatic Container Cranes

Satoshi Kunimitsu, Non-member, Hajime Asama, Member,
and Kuniaki Kawabata, Member (RIKEN)

This paper describes a measurement method of the relative position between the spreader of a quayside container crane and a container for an automatic container handling system. It is essential to realize an efficient loading and unloading task of quayside container cranes. First we describe our basic strategy of measurement method in order to realize an efficient loading and unloading task. Next we explain a fast and reliable measurement method of the relative position concretely. The measurement method is realized with an image processing method based on a template matching. Then we consider the adjustment method of prepared template by taking some images. Finally we confirm the validity of our proposed method with some experiments.

キーワード: 分散センシング, 画像処理, テンプレートマッチング, コンテナ, クレーン
Keywords: distributed sensing, image processing, template matching, container, crane

1. はじめに

コンテナターミナルは陸上輸送と海上輸送の接点に位置し、コンテナ船とトラックなど異種輸送手段間のコンテナの積替え、小口貨物のコンテナへの詰め込みおよびその逆の作業、空コンテナの保管並びに修理、荷役機械の保守、修理などを行う施設である。荷役機械は、例えば岸壁に設置されコンテナ船に積み込みまたは積卸しを行う岸壁用コンテナクレーン(以下コンテナクレーン)がある⁽¹⁾。

コンテナクレーンの運転は、通常機上の運転室にオペレータが乗り込み、マニュアルで操作されている。このため、同じコンテナクレーンでもオペレータの技量によって、荷役効率は変化する。

コンテナクレーンの荷役効率が安定して向上すると、コンテナ船の滞船時間は短くなり、コンテナターミナルの運営経費を節減できる。このため、コンテナクレーンの荷役効率の向上に対するニーズは大きい。そこで、コンテナクレーンの製造メーカは荷役効率の向上を目標に自動運転システムの開発を進めている。現在のところ、コンテナ船上と岸壁側を結ぶ荷役経路の移動を自動化しているが、荷役

効率に直結するコンテナのハンドリング作業の自動化は進んでいない⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その理由の一つとして、コンテナのハンドリング作業の自動化に必要なコンテナクレーンの吊具と荷役対象のコンテナ(以下目標コンテナ)の相対位置を精度良く測定する技術が確立していないことが挙げられる。

現状の自動運転システムには、コンテナクレーンのトロリ(陸側と海側を移動する横行装置、図3参照)上に鉛直下向きに設置した距離計で、トロリの移動に伴いコンテナ船上のコンテナの積付け形状を測定する機能がある。しかし、この測定法ではトロリの位置や吊荷重の影響で起伏けたたわみ量が増えるため、トロリの移動方向である横行方向の位置決め精度は数百ミリメートルと悪く、コンテナの自動ハンドリングに利用することはできない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一方、吊具の四隅にカメラとスリット光源を搭載し、光切断法の原理で吊具とコンテナの相対位置を直接測定する方法が提案されている⁽⁶⁾。しかし、この方法は屋外環境において、安全でかつ十分な光量を持つスリット光を実現することが難しいため、実用化は困難と考えられる。

そこで、本論文では、カメラを用いたコンテナクレーンの吊具と目標コンテナの相対位置を測定する方法を提案す

る。まずコンテナクレーンの荷役効率を向上する手段の基本構想及びその際に発生する問題点を述べ、次に画像処理による高速かつ信頼性の高いコンテナの相対位置測定方法を具体的に説明し、実験によりその有効性を示す。

2. コンテナクレーンの荷役作業

2.1 コンテナの形状

図1に、コンテナクレーンが扱うコンテナの外形を示す。コンテナの外形は略長方で、8つのコーナーに各々隅金具と呼ばれるハンドリングの際の着脱に用いる金具が配置されている。コンテナの幅 W は全て8 [ft.] に統一されている。コンテナは、通常長さ L によって、40 [ft.] コンテナと20 [ft.] コンテナの2種類に大別されている。同図の S と P は、隅金具の穴中心間の距離である。

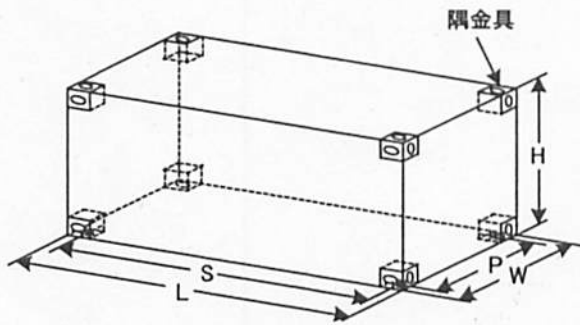


図1. コンテナの外形
Fig.1. Structure of container

2.2 荷役作業

図2に、コンテナクレーンの外観を示す。コンテナクレーンの荷役作業は、空間的に陸側荷役と海側荷役及びそれらをつなぐ荷役経路移動に分類できる⁽⁴⁾。図3に、コンテナクレーンの荷役作業の分類を示す。ここで、陸側荷役と海側荷役とは、吊具でコンテナを掴んだり、掴んだコンテナを卸すコンテナのハンドリング作業のことである。



図2. コンテナクレーンの外観
Fig.2. Photo of container crane

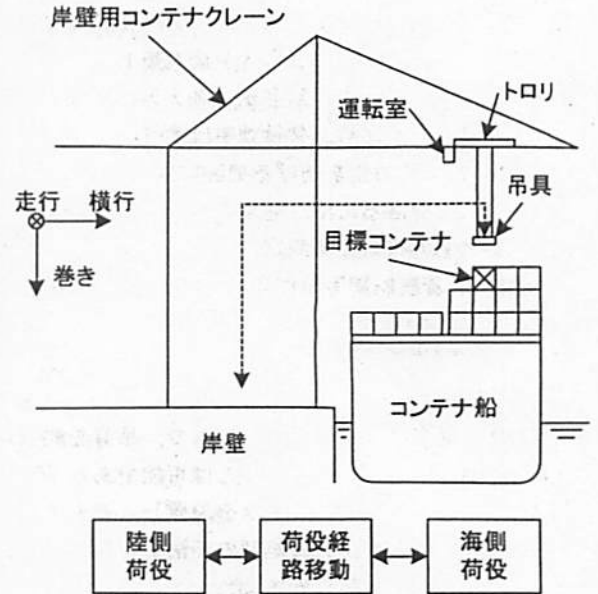


図3. 荷役作業
Fig.3. Container loading and unloading task

図4に、吊具とコンテナの位置合せの機構を示す。コンテナのハンドリング作業は、吊具の四隅にある4つのツイストロックピンを、各々コンテナ上面の四隅にある隅金具の穴部分に差し込み、90 [deg] 回転させてロックすることで実現する。

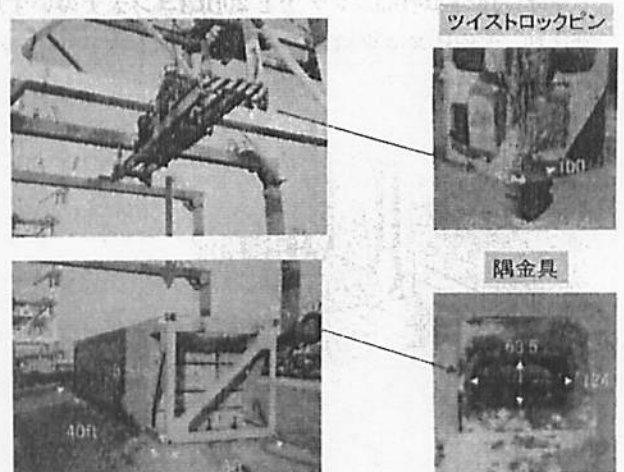


図4. 吊具とコンテナの位置合せ
Fig.4. Spreader positioning to a container

2.3 自動運転システム

従来の自動運転システムは、図3に示す目標コンテナの上空までの移動を自動化しているに過ぎない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。即ち、自動運転システムは、上位システムの指令に基づき、陸側または海側の略目標位置 (横行方向数百ミリメートルの精度) の上空数メートルの位置に吊具を移動させて停止する。そして、運転室のオペレータが手動介入してコンテナの相

対位置決めを行いながらハンドリング作業を行い、荷役作業を完了させている。コンテナクレーンの荷役作業は、吊具（吊荷）とコンテナの位置合せが最も難しく、時間のロスが発生し易い。現状の自動運転システムは、それをオペレータに委ねているため、荷役効率はオペレータの熟練度に依存し、それが省力化を妨げる要因になっている。即ち、荷役効率の向上を図るには、従来のオペレータに依存した吊具とコンテナの相対位置測定、ツイストロックピンの隅金具への挿入、着脱制御等の作業を自動化する必要がある。

3. 相対位置測定システムの開発構想

3.1 基本構想

2.3 より、従来の自動運転システムで、吊具を略目標位置の上空に自動的に到達させることは可能である。そこで、人間の目の代わりに吊具にカメラを設置し、そのカメラで目標コンテナを撮影し、画像処理の手法を応用して、その相対位置を直接測定することにした。

ただし、2.1 に記載したように、コンテナの寸法は大きく、数メートルの近距離でコンテナ全体を撮影することは難しい。また、仮に実現したとしても画素分解能は粗くなり、測定精度は期待できない。そこで、吊具の四隅にカメラを分散的に配置し、各カメラで対向する目標コンテナ上面の隅金具を撮影して、穴中心位置を測定し、それらを統合してコンテナの相対位置を計算することにした。

図5に、コンテナの相対位置を測定する分散したカメラの配置を示す。カメラは、吊具の四隅に配置するため、吊具の伸縮に伴い40[ft.]コンテナと20[ft.]コンテナのいずれの場合も、その隅金具を撮影することができる。

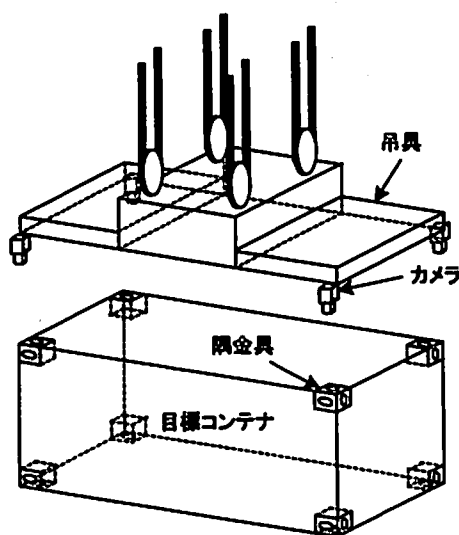


図5. カメラの配置

Fig.5. Arrangement of cameras

図6に、ツイストロックピンと隅金具の穴部分の寸法を示す。同図(a)がツイストロックピン、同図(b)が隅金具の穴部分である。

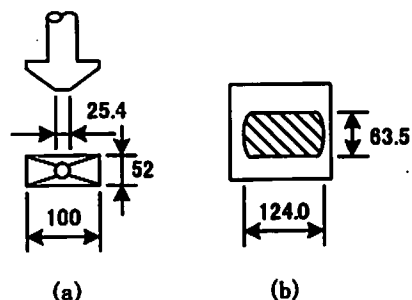


図6. ツイストロックピンと隅金具の穴部分の寸法
Fig.6. Dimensions of a twist rock pin and a hole of corner fitting

ツイストロックピンの先端が25.4[mmφ]、隅金具の穴部分の幅が63.5[mm]より、吊具のツイストロックピンと隅金具の穴部分との位置ずれの許容値は、±19.1[mm]

($=63.5-25.4$)/2)になる。従って、隅金具の穴中心位置の測定分解能は、2~4[mm]程度、測定精度は±10[mm]程度が要求される。尚、目標コンテナの相対位置測定は、吊具が目標コンテナの上空500~5000[mm]の範囲で行うこととする。

3.2 システムの基本設計

コンテナクレーンの吊具に設置したカメラで撮影した画像から隅金具の穴中心位置を測定する方法は、照明の変動に比較的強く屋外環境での適用が試みられている正規化相関係数を用いたテンプレートマッチング処理が有効と考え、それを適用することにした⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

以下、画像処理の観点から、カメラで撮影した画像から隅金具の穴中心位置を測定するときの課題と対応策についてまとめる。

(1) 撮影照度の変化

コンテナクレーンの荷役作業は屋外環境の下で行われ、夜間も荷役作業は行われる。このため、昼夜等撮影時刻や天候によって、撮影するときの照度は大きく変化する。このとき、照度がカメラのダイナミックレンジの範囲を越えると、画像上で隅金具の濃度分布パターンは変化する。

そこで、自動絞り機構を有するレンズを用いて、隅金具の撮影を行うことにした。ただし、絞りを開き過ぎると被写界深度が浅くなり、画像がぼけるという新たな問題が発生するので、照明光源を設置することでこれを解決することにした。

(2) 多様な隅金具の濃度分布パターン

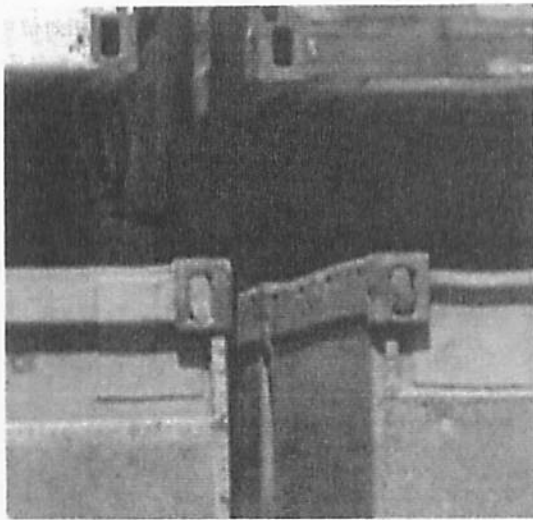
隅金具の表面の濃度分布パターンは、各隅金具毎に異なり、また、同じ隅金具でも撮影時刻や周囲環境条件により差異ができる。以下に、考えられる理由を記す。

- ① 隅金具の表面は、コンテナと同じ塗料で塗装されるので、コンテナと同様に色の種類が多い。
- ② 隅金具は、コンテナをハンドリングするときに吊具と直接接触する部分であるため、塗料が不規則

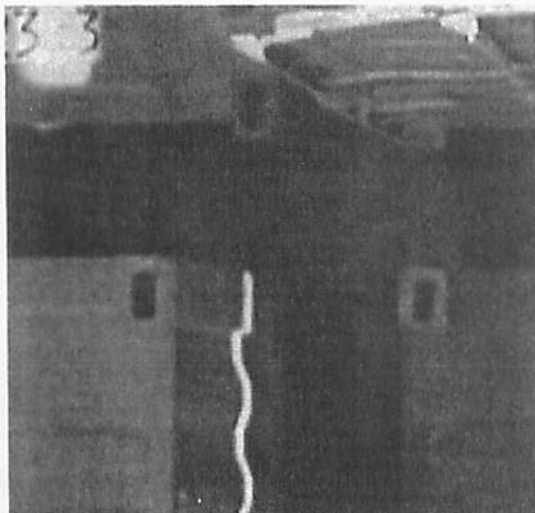
に剥がれ易い。また、塗料が剥がれた部分は、腐食し易い。

- ③ 隅金具の穴部分とその周辺部には段差があるため、穴部分の濃度分布が低下し、影になり易い。ただし、太陽の方位や高度によっては、穴部分の濃度分布が高くなる場合もある。
- ④ 太陽の方位や高度及び夜間照明によっては、コンテナクレーンの構造体自身や隣接コンテナの影が、隅金具の表面にできる場合がある。
- ⑤ 特に、夜間のとき吊具と目標コンテナ間の距離が短くなると、吊具の影が隅金具の表面にできる場合がある。

図7に、コンテナを撮影した画像の例を示す。画像の左下のコンテナに注目すると、同図(a)は、隅金具の穴部分の濃度が周辺部と比較して高く明るい例であり、同図(b)は、低く暗い例である。



(a)



(b)

図7. コンテナを撮影した画像の例
Fig.7. Example of images of container

屋外の環境下にあるコンテナの表面は、汚れ易く、さらに影もできる。このとき、隅金具に似た濃度分布パターンができる可能性もある。即ち、各隅金具毎に濃度分布パターンに差異があり、また隅金具の穴部分の濃度分布パターンは屋外環境条件によって変化し、さらにコンテナの表面に隅金具に似た濃度分布パターンができる可能性もある。このため、標準的な隅金具のテンプレート画像を予め作成し、それを基にテンプレートマッチング処理で隅金具を検出することは困難である。そこで、テンプレート画像は、ハンドリングするコンテナ毎にその場で作成することにした。具体的な作成方法は、後述する。

(3) 撮影距離の変化

吊具を目標コンテナに接近させていくと、カメラの撮影距離が変化する。従って、それに伴いカメラの視野の大きさも変化する。このため、一般に、そのままの画像では、隅金具の大きさがテンプレート画像とは異なるため、テンプレートマッチング処理を適用することはできない。そこで、画像を撮影するときに、同時に撮影距離を測定し、それを基に画像をスケール変換して、画像上で隅金具の大きさをテンプレート画像と同じ大きさにすることで、撮影距離の変化の影響をキャンセルすることにした。

(4) 縮尺と傾きの影響

テンプレートマッチング処理の課題として、撮影した画像の縮尺や傾きに制約があることが挙げられる。縮尺については、(3)より撮影距離を基にスケール変換をするので、撮影距離の測定精度が縮尺に直接関係する。また、吊荷のアンバランスや風等によって、吊具が回転する場合は予想される。そこで、コンテナの隅金具付近を撮影した画像を基にテンプレートマッチング処理を行い、画像の縮尺と傾きの影響をシミュレーションで調べた。図8に、シミュレーションで得られた画像の例を示す。

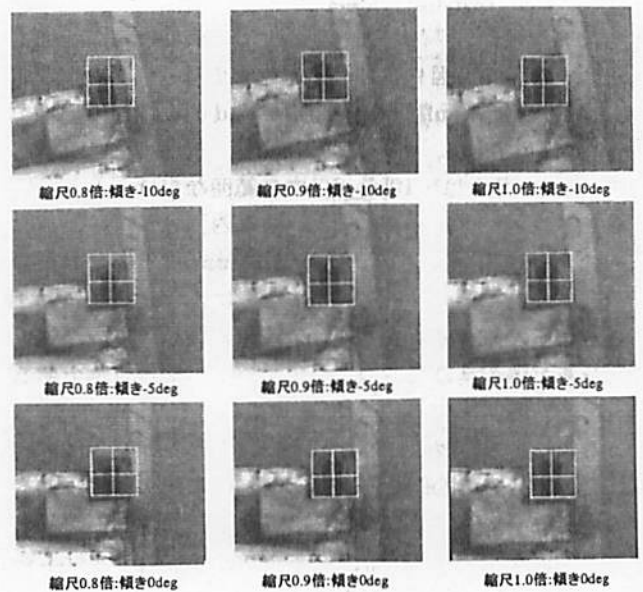


図8. シミュレーション結果
Fig.8. Result of simulation

シミュレーションは、同図右下の画像を縮尺 1.0 倍、傾き 0[deg]と設定し、同画像の矩形白線内の隅金具領域をテンプレート画像に設定し、同図右下の画像に対して、縮尺を 0.8~1.2 倍の範囲、傾きを-10~+10[deg]の範囲でアフィン変換⁽¹⁰⁾後、テンプレートマッチング処理を実施した。なお、傾きのマイナス記号は反時計方向、プラス記号は時計方向に画像を回転させたことを表す。また、矩形白線内の白線十字線の交点は、検出した穴中心位置を示している。

同図右 1 列の画像は、縮尺を 1.0 倍で固定し、傾きを-10~0[deg]の範囲で変化させた場合で、画像が傾いてもほぼ精度良く穴中心位置を検出していることを確認できる。

一方、同図下 1 列の画像は、傾きを 0[deg]で固定し、縮尺を 0.8~1.0 倍の範囲で変化させた場合で、画像の縮尺が変化すると穴中心位置の検出精度が悪くなることを確認できる。図 9 に、シミュレーションで計算した縮尺と傾きに対する正規化相関値と穴中心位置の検出誤差の関係を示す。

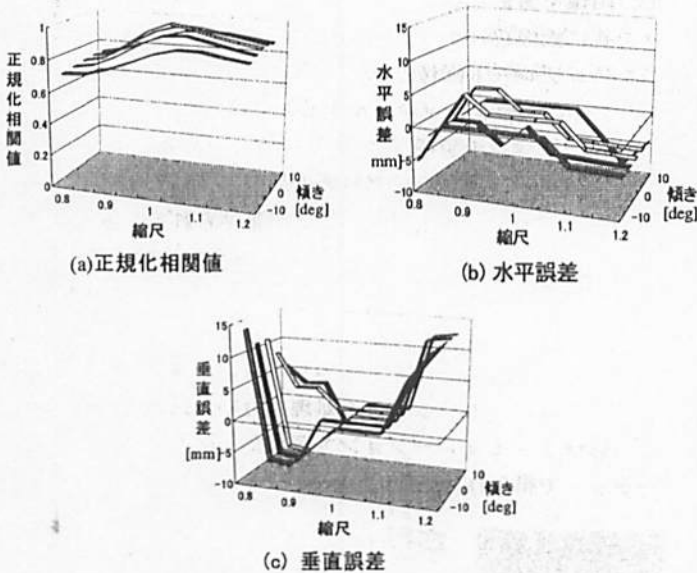


図 9. 縮尺と傾きの影響
Fig.9. Influence of scale and skew

同図より、傾きは±10[deg]以内の範囲ならほとんど影響が無いのに対して、縮尺は±0.1 倍以内では影響は小さいものの、±0.2 倍になると誤差が±10[mm]以上になり影響が大きくなることが判った。このように、隅金具のテンプレート画像が傾きに対して許容値が大きいのは、隅金具の濃度分布が隅金具の穴の中心部に対してほぼ点対称であるからと考えられる。

実際のコンテナクレーンで、40[ft.]の吊具が±5[deg]回転すると、先端で横行方向に±530[mm]程度スキューする(斜めになる)計算になる。この場合、吊具と隣接コンテナとの衝突を回避するため、クレーンのオペレータは、通常荷掴みや荷卸し動作に入る前に、吊具のスキューを修正する。従って、荷掴みや荷卸し動作の自動化のために行うテンプレートマッチング処理は、±10[deg]以内の範囲で傾

きの影響を無視できるならば十分であり、傾きについての補正は不要と判断した。

一方、縮尺については、撮影距離の測定精度が関係する。例えば、撮影距離が 5000[mm]で測定誤差が±100[mm]の場合、スケール変換後の縮尺の誤差は 1.00±0.03 倍となり影響は小さい。しかし、撮影距離が 500[mm]で測定誤差が±100[mm]の場合、スケール変換後の縮尺の誤差は 1.00±0.20 倍となり影響は大きくなる。このように、縮尺については撮影距離が短くなるほど、測定誤差の影響が顕著になるので、撮影距離の測定方法が課題となる。現在のところ、コンテナクレーンに標準で設置されている巻きモーター用のエンコーダ値を基に撮影距離を計算する予定であるが、精度が不十分な場合は別の測距センサを設置することを考える。

4. コンテナの相対位置測定方法

吊具に分散して配置した 4 台のカメラで、各々対応する隅金具の穴中心位置を測定すれば、コンテナの相対位置は、カメラの位置を考慮するとそれらの平均値として容易に計算できる。

ここで、図 10 は吊具が目標コンテナの上空に到達後、吊具のカメラで目標コンテナの相対位置を測定するアルゴリズムをフローチャートにより示したものである。

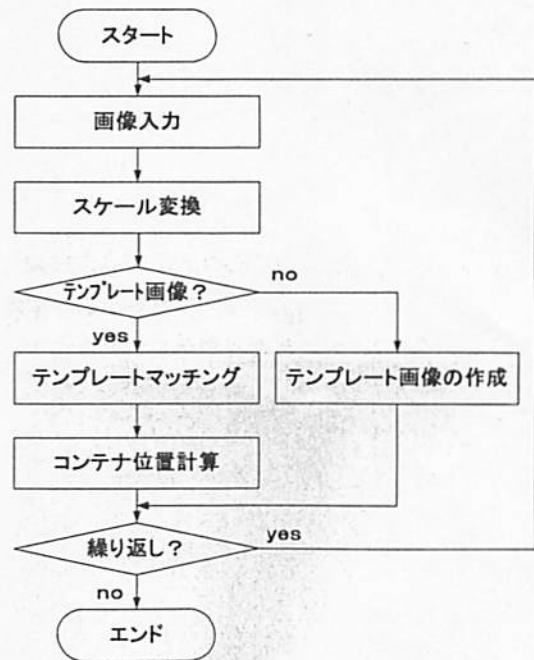


図 10. アルゴリズム
Fig.10. Algorithm

このアルゴリズムの特徴は、コンテナのハンドリング作業をするとき、その場でまず目標コンテナ上面の隅金具のテンプレート画像を作成し、続いてそのテンプレート画像を基にテンプレートマッチング処理をして各隅金具の穴中心位置を検出することで、連続的に吊具と目標コンテナの

相対位置を測定するところにある。テンプレートマッチング処理に要する時間は、テンプレート画像の作成に要する時間と比較すれば十分に短く、実時間処理 (33[msec]以内) が可能である⁽⁷⁾。以下で、主な処理の概要を説明する。

4.1 テンプレートマッチング処理

テンプレートマッチング処理は、正規化相関係数を利用している。正規化相関係数 R は、画像の平均値を \bar{f} 、テンプレート画像の平均値を \bar{g} とすると、

$$R(x, y) = \frac{\sum_m \sum_n (f(x+m, y+n) - \bar{f})(g(m, n) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (f(x+m, y+n) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_m \sum_n (g(m, n) - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

となる。正規化相関係数 R は、画像の平均値をキャンセルし、かつ共分散の大きさを正規化しているため、照明の変動等による濃度変化への追従性が高いという特徴がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

4.2 スケール変換

スケール変換は、撮影した画像の隅金具の大きさを一定にするため、撮影距離を基に画像を拡大または縮小変換する処理である。拡大または縮小の変換係数 k は、標準の撮影距離を D_0 、画像の撮影距離を D とすると、

$$k = \frac{D}{D_0} \quad (2)$$

となる。ここで、撮影距離は、コンテナクレーンの巻きモーター用エンコーダ値を事前にキャリブレーションしておくことで測定可能である。これにより、拡大または縮小計算した結果は、共1次内挿法⁽¹⁰⁾で補間して画像データに変換している。

また、画像をスケール変換する際に、撮影距離の測定誤差が原因で、スケール変換誤差が発生する。いま、画像の撮影距離の測定誤差を ΔD とすると、変換係数 k の誤差分 Δk は、

$$\Delta k = \frac{D}{D + \Delta D} \quad (3)$$

となる。(3)式より、画像の撮影距離 D が短くなるほど、スケール変換誤差の影響が顕著になることが判る。

4.3 テンプレート画像の作成

テンプレート画像は、(1)領域の限定と(2)隅金具の検出の順に処理を行い作成する。

(1)領域の限定

図7に示すように、目標コンテナの隅金具を撮影した画像には、同時に隣接コンテナの隅金具も視野に入る可能性があるため、目標コンテナの隅金具を確実に抽出する必要がある。このとき、吊具上のカメラと目標コンテナの位置関係から、画像上で目標コンテナのおよその位置は特定できる。そこで、まず画像上の目標コンテナを抽出し、次に

隅金具を含む領域を限定する。図11に、領域の限定をする処理の手順を示す。画像の左下部分のコンテナを、目標コンテナに設定している。同図(a)を、原画像と仮定する。

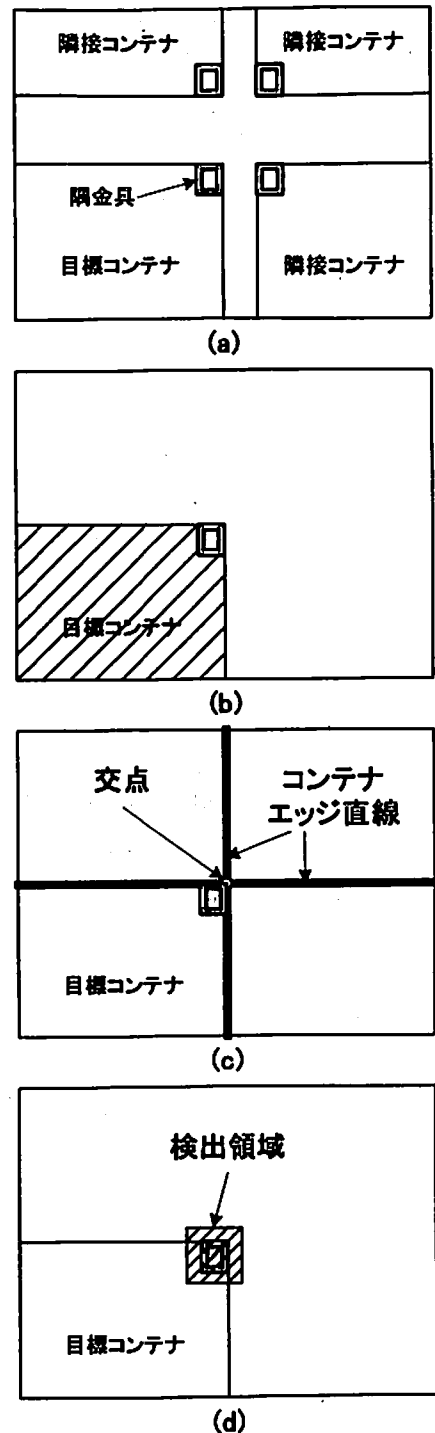


図11. 領域の限定
Fig.11. Range discrimination

同図(a)において、目標コンテナの右上部分の隅金具を含む領域を検出する。また、同図(b)は、目標コンテナを抽出した結果 (斜線部分) を示している。コンテナの輪郭線は、微分処理によって抽出できる。そこで、微分画像を水平軸

と垂直軸に各々射影処理すると、目標コンテナの概略位置は予め分かっているため、その近傍を探索してピーク位置を検出すれば、目標コンテナの輪郭線(領域)を抽出できる。さらに、同図(c)は、目標コンテナの輪郭線の近似直線とその交点を示している。抽出した目標コンテナの輪郭線を Hough 変換⁽¹⁰⁾すれば、目標コンテナの水平方向と垂直方向の輪郭線の直線近似式が得られる。これら2つの直線近似式の交点は、容易に計算できる。同図(d)は、隅金具を含む領域を限定した結果を示している。2直線の交点を含む近傍領域を隅金具が存在する検出領域として指定する。なお、コンテナの輪郭線と隅金具の輪郭線は、一致していない場合もあるので、検出領域は少し広めに設定する。

(2) 隅金具の検出

限定した検出領域の中で、隅金具の穴中心位置を測定する。測定方法は、隅金具の幾何学的特徴である穴部分の輪郭線を利用する。隅金具の穴部分の濃度分布は、図7に示すように、大別して周辺部と比較して低く暗い場合と、同等以上に高く明るい場合の2種類ある。これらを分析すると、図12に示すように整理できる。即ち、同図(a)は穴部分の濃度が高い場合であるが、隅金具の穴部分の濃度が高い部分と周辺部分の境界は濃度が低くなっている。これは、穴部分と周辺部分に段差があるため、これにより穴部分の輪郭線に沿って影ができる。一方、同図(b)は濃度が低い場合である。A-A'断面の微分結果を比較すると、隅金具の穴部分の輪郭線は、穴部分の濃度が高い場合(同図(a))は低くなり、逆に低い場合(同図(b))は高くなる。

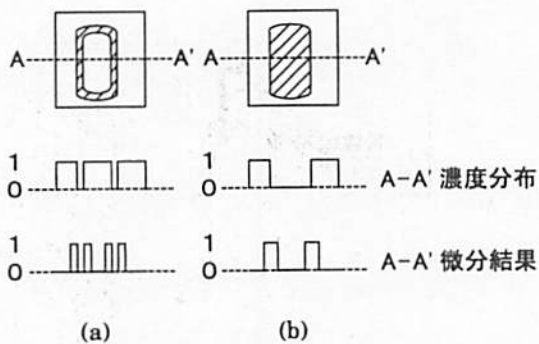


図12. 隅金具の典型的な濃度分布パターン

Fig.12 Typical brightness distribution of corner fittings

以上より、2種類の隅金具の画像に対して、同一のテンプレート画像で穴部分の輪郭線を検出することは困難である。そこで、穴部分の濃度分布パターンが高い場合と低い場合の2種類について、各々隅金具の穴部分の輪郭線を基に穴中心位置を検出する穴部分のテンプレート画像(穴テンプレート)を作成することにした。図13に、作成した穴部分のテンプレート画像(×印長方形の内側)を示す。同図(a)は、隅金具の微分画像である。同図(b)は、同図(a)の濃度を反転したものである。微分画像を採用することで、隅金具の濃度分布ではなく、穴部分の輪郭線を主に利用す

ることを意図した。この方法により、隅金具の穴部分が部分的に影になったり、光る場合にも対応できる。

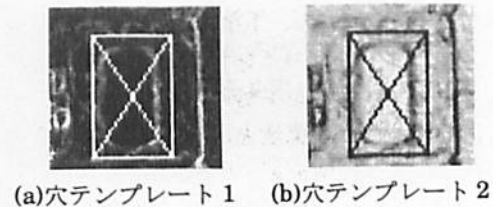


図13. 穴部分のテンプレート画像

Fig.13. Template images of a corner fitting

限定した検出領域に対して、上記2つの穴部分のテンプレート画像でテンプレートマッチング処理を行う。そして、正規化相関係数 R (以下正規化相関値) を比較して、正規化相関値が高い方の検出位置を隅金具の穴中心位置とする。

これにより、穴部分の濃度分布が高い場合と低い場合のいずれでも、隅金具の穴中心位置を確実に検出することが可能である。

5. 隅金具相対位置測定実験

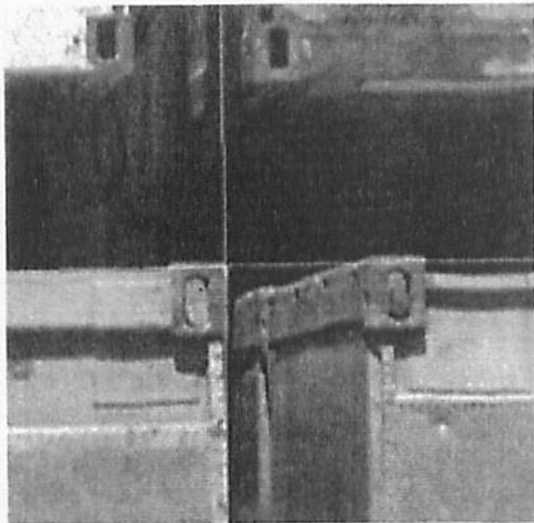
5.1 テンプレート画像の作成

隣接コンテナを含む画像から目標コンテナの隅金具の位置を検出するテンプレート画像作成のアルゴリズムの有効性を確認する実験を行った。図14と図15は、図7の画像に対して隅金具の位置を測定した結果を示している。図14(a)は、目標コンテナの隅金具の穴部分の濃度が高い画像(図7(a))に対して、目標コンテナの輪郭線の近似直線を求めた結果である。同図(b)は、限定した領域内で図13(a)のテンプレート画像を基にテンプレートマッチング処理をした結果、また、同図(c)は図13(b)のテンプレート画像を基にテンプレートマッチング処理をした結果である。同図(b)(c)内で、大きな白線の長方形が限定した検出領域であり、白線の×印長方形が検出結果である。同図(b)では、隅金具の穴部分は認識されていないが、同図(c)では、隅金具の穴部分は正確に認識されている。

同様に、図15(a)は目標コンテナの隅金具の穴部分の濃度が低い画像(図7(b))に対して、目標コンテナの輪郭線の近似直線を求めた結果である。同図(b)は、図13(a)のテンプレート画像を基にテンプレートマッチング処理をした結果、また、同図(c)は図13(b)のテンプレート画像を基にテンプレートマッチング処理をした結果である。同図(b)では、隅金具の穴部分は正確に認識されているが、同図(c)では、隅金具の穴部分は認識されていない。

次に、テンプレートマッチング処理で得られた正規化相関値を表1に示す。

さらに様々な条件の11例のコンテナ画像に対して本システムにより実験を行い、正規化相関値を計算した。図16に、計13例の画像と穴テンプレートの正規化相関値の関



(a)



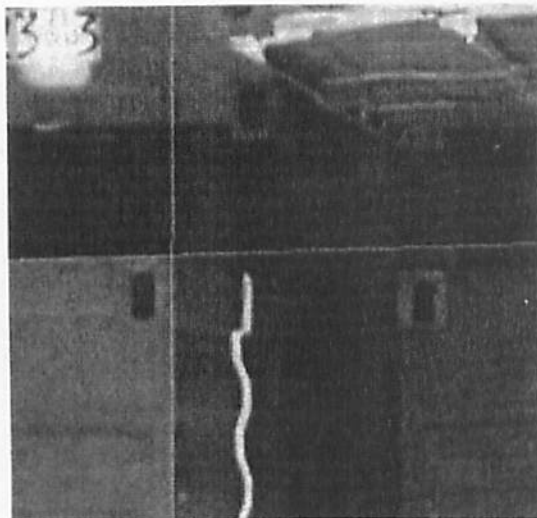
(b)



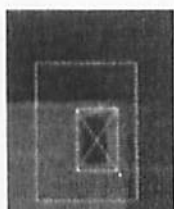
(c)

図 14. 隅金具の検出結果 1

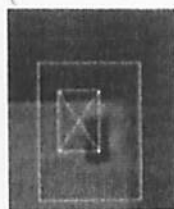
Fig.14. Experimental result 1 of detection of a corner fitting



(a)



(b)



(c)

図 15. 隅金具の検出結果 2

Fig.15. Experimental result 2 of detection of a corner fit.

表 1. 正規化相関値

Table 1. Normal correlation coefficient

テンプレート画像 画像	穴テンプレート 1 (図 13(a))	穴テンプレート 2 (図 13(b))
穴部分の濃度：高い (図 7 (a), 図 14(a))	0.23 (穴検出失敗)	0.40 (穴検出成功)
穴部分の濃度：低い (図 7 (b), 図 15(a))	0.54 (穴検出成功)	0.24 (穴検出失敗)

係を示す。同図の横軸は画像で、13 種類あることを示している。画像の①と②は穴部分の濃度が高い(明るい)場合、③～⑬は穴部分の濃度が低い(暗い)場合である。なお、図 7 (a)は画像①、同図(b)は画像⑥に相当する。

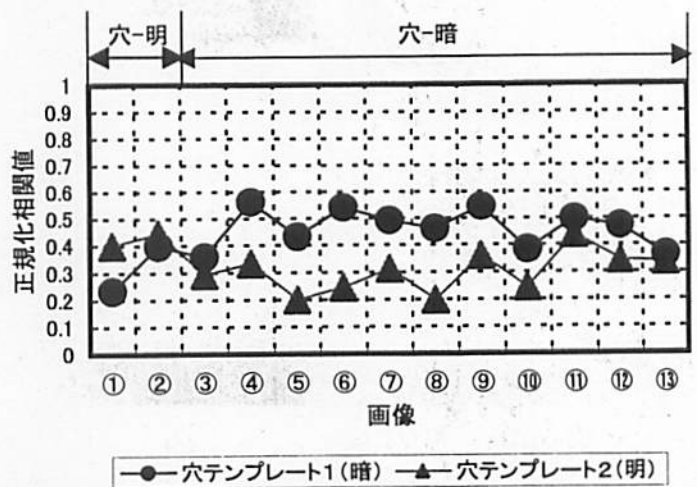


図 16. 穴テンプレートの正規化相関値

Fig.16. Normal correlation coefficient of hole's templates

図 16 より、2つの穴テンプレートの正規化相関値からどちらを採用するかを条件式を経験的に次のように設定した。

- 優先順位 1 : $ana1 > ana2 \cap ana1 \geq 0.30 \Rightarrow$ 穴テンプレート 1 採用
- 優先順位 2 : $ana1 < ana2 \cap ana2 \geq 0.30 \Rightarrow$ 穴テンプレート 2 採用
- 優先順位 3 : 上記以外 \Rightarrow 検出不能と判定

ここで、 $ana1$ は穴テンプレート 1 の正規化相関値、 $ana2$ は穴テンプレート 2 の正規化相関値である。上記条件式によって、2つの穴テンプレートの正規化相関値から計 13 例の隅金具の穴中心位置を検出することが可能である。今後、さらに多数のデータを評価することで、条件式の数値の妥当性を検証する予定である。

以上より、提案したテンプレート画像を作成するアルゴリズムの有効性を確認できた。

5.2 撮影距離の変化

撮影距離の変化に対して、撮影距離を基に画像をスケー

ル変換することで、テンプレートマッチング処理が可能であることを確認する実験を行った。巻き高さを変更して静止させた吊具上のカメラで、地上の目標コンテナの隅金具付近を撮影し、撮影距離を基にスケール変換後、テンプレートマッチング処理をして隅金具の位置を検出する処理を実施した。撮影距離は、巻きモーターのエンコーダ値からキャリブレーションした値を使用した。

図 17 に、検出した隅金具の位置 (×印長方形) を逆スケール変換し、元の画像に重ねて表示したものを示す。

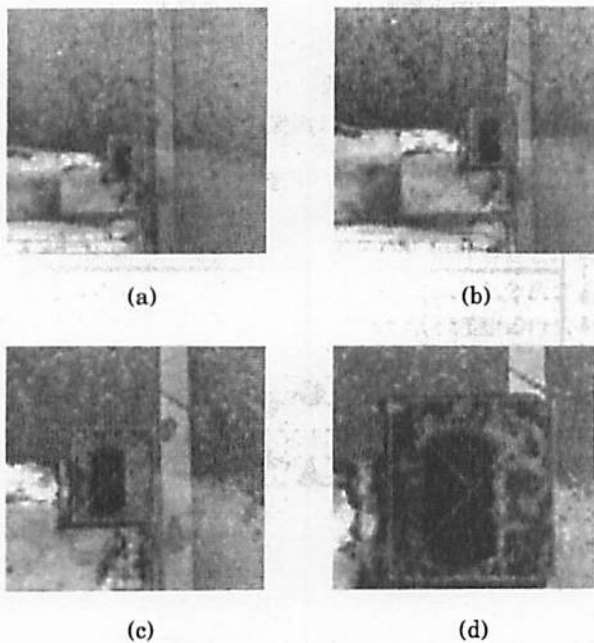


図 17. 隅金具の検出結果 3

Fig.16. Experimental result 3 of detection of a corner fitting

表 2 に、測定結果を示す。撮影距離は、800[mm]から 3700[mm]の範囲で約 1000[mm]ピッチとした。画素分解能は、撮影距離 800[mm]で 0.7[mm/pixel]であった。同表より、隅金具の穴部分の中心位置は、撮影距離に関係なく ±10[mm]以内の精度で測定できた。これは、3 章で言及した要求精度を満足する。また、テンプレート画像の大きさと画像の隅金具の大きさを比較した結果、巻きモーターのエンコーダ値で換算した撮影距離の測定誤差は ±4% 以内であり、静的には問題ないことが判った。

表 2. 測定結果

Table2.Experimental result of measurement

	撮影距離	画素分解能	穴位置測定誤差
図 17(a)	3700[mm]	2.9[mm/pixel]	8.7[mm]
図 17(b)	2700[mm]	2.1[mm/pixel]	8.5[mm]
図 17(c)	1600[mm]	1.4[mm/pixel]	5.4[mm]
図 17(d)	800[mm]	0.7[mm/pixel]	9.1[mm]

以上より、撮影距離の変化に対して、撮影距離を基に画像をスケール変換すれば、テンプレートマッチング処理が可能であることを確認できた。

6. 終わりに

本論文では、コンテナクレーンの荷役効率の向上を目標として、コンテナのハンドリング作業を高速かつ自動的に実現するためのカメラを用いたコンテナクレーンの吊具と目標コンテナの相対位置を測定する方法を提案した。その特徴は、(1)コンテナクレーンの吊具の四隅にカメラを設置し、対応する隅金具の穴中心位置を検出して、それらの部分情報を統合し相対位置を計算する分散センシングの手法を採用していること、(2)隅金具の検出手段として、照明の変動に比較的強いと言われていた正規化相関係数を用いたテンプレートマッチング処理を採用するため、①撮影距離を基に画像をスケール変換する方法を確立し、②検出目標である隅金具の濃度分布の多様性に対して荷役作業時毎に目標コンテナのテンプレート画像を作成し、さらに③2種類の穴テンプレート画像を基にテンプレート画像を作成する方法を考案したことである。

テンプレートマッチング処理については、実験によりその有効性を示した。

今後、さらに多様な条件のコンテナの画像データを入手し、考案したアルゴリズムの信頼性を検証する。また、実時間で処理が可能なシステムを構築し、コンテナクレーンに搭載して性能検証を行っていく予定である。

(平成 12 年 9 月 25 日受付, 平成 13 年 1 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 日本機械学会編: 機械工学便覧 C 3 編運搬機械(1991-6)
- (2) 「港湾荷役」編集委員会: 「二十一世紀の港湾荷役を展望する (その 3) 主として港湾荷役の自動化・省エネ化動向を見る(1)」, 港湾荷役 第 43 巻 5 号, 542~547 (1998-9)
- (3) 「港湾荷役」編集委員会: 「二十一世紀の港湾荷役を展望する (その 3) 主として港湾荷役の自動化・省エネ化動向を見る(2)」, 港湾荷役 第 43 巻 6 号, 641~646 (1998-11)
- (4) 村田五雄・中島正道: 「コンテナクレーンの自動化」日本機械学会論文集 (C 編) 59 巻 564 号, 2401~2407 (1993-8)
- (5) 早川清隆・中島達也・長井裕幸・松本尚巳・高橋滋一・大川登志男: 「川崎港自動化コンテナターミナル」NKK 技報 No.155, 25~30 (1996)
- (6) EUROPEAN PATENT APPLICATION 0440915A1
「Procedure and apparatus for locating a container for lifting」
- (7) 村松彰二・小林芳樹・高橋一哉・清水英志: 「テンプレートマッチングにおけるハードウェア化と高速化手

法の開発」電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J83-D-II No.7, 1667~1675 (2000-7)

- (8) 齊藤文彦:「遺伝的アルゴリズムによる正規化相関画像のマッチングに関する考察」電学論 C 120 巻, 236~243 (2000-2)
- (9) 日台健一・溝口博・平岡和幸・重原孝臣・三島健稔:「明るさ変化, 大きさ変化に頑健な顔発見手法」第5回ロボティクスシンポジウム, 232~237 (2000-3)
- (10) 高木幹雄・下田陽久:「画像解析ハンドブック」東京大学出版会(1991-1)

國光 智



(非会員)1961年2月8日生まれ.1983年3月慶應義塾大学工学部計測工学科卒業.同年三菱重工業(株)入社, 広島研究所に配属. 現在, 理化学研究所工学基盤研究部に勤務. 主として, 荷役機器における画像処理応用に関する研究に従事. 計測自動制御学会会員.

浅間 一



(正員)1959年1月18日生まれ.1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補, 生化学システム研究室研究員, 前任研究員を経て, 現在同工学基盤研究部技術開発促進室室長. 1999年埼玉大学大学院理工学研究科客員助教授.

自律分散型ロボットシステム, 複数移動ロボットの協調技術, バイオプロセスの知能化技術などの開発研究に従事. 1995年日本機械学会ロボメック賞, 1996年日本機械学会ロボメカ講演会 Best Poster 賞, RoboCup-98 Japan Open 人工知能学会賞 (UTTORI United Team) 等受賞. 工学博士 (東京大学). Distributed Autonomous Robotic Systems(Springer-Verlag)第1, 2巻の編者. IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 精密工学会等の会員.

川端 邦明



(正員)1970年2月3日生まれ.1992年法政大学工学部電気工学科電気電子工学専攻卒業. 1994年同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 1997年同大学院工学研究科電気工学専攻後期博士課程修了. 博士 (工学). 同年理化学研究所基礎科学特別研究員として生化学システム

研究室勤務, 2000年理化学研究所工学基盤研究部基盤技術開発室研究員. 自律分散ロボットシステム, 学習・進化システムに関する研究に従事. IEEE, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 人工知能学会, 日本原子力学会等の会員.