

論 文

STGC (シングルトラックグレイコード) を用いた投影型空間
エンコーダ

新居 英明^{†a)} ラメッシュ ラスカ^{††} 藤井 智子^{†††}
常盤 拓司^{††††} 稲見 昌彦^{†††††}

A Proposal for Space-Encoder Using Single-Track-Gray-Code

Hideaki NII^{†a)}, Ramesh RASKAR^{††}, Tomoko FUJII^{†††}, Takuji TOKIWA^{††††},
and Masahiko INAMI^{†††††}

あらまし 回転角度を取得するセンサに用いられる絶対角度取得手法を、空間座標をリアルタイムに取得することに応用したシステムを提案する。回転角度を取得するロータリエンコーダと同様の機構を用いることから、本システムを投影型空間エンコーダと呼称する。本システムは座標情報をもったパターンを投影する空間構造化光の送信部と、投影された空間座標情報を取得する受信部から構成される。受信部では送信部の光軸方向からの角度情報を取得できる。単体では角度情報だけであるが複数システムを組み合わせることにより三次元空間位置情報を構成することが可能である。座標情報をもつ投影パターンとしてはシングルトラックグレイコードを用いることにより、レンズ光学系を必要としない送信部を構成できることが特徴である。本論文では、手法の提案を行うとともに試験的な実装を行い評価を行っている。

キーワード モーションキャプチャ、空間構造化、シングルトラックグレイコード、LED

1. ま え が き

モーションキャプチャシステム等に使われている空間位置のリアルタイム計測を小型装置で実現できれば、ヒューマンインタフェースやユビキタスネットワークなど各種の分野で応用が期待できる。例えば、ゲームの体験者の体の位置を手を持った小型装置で取得すると、体験者の体の動きをゲームの中に反映するモ-

ーションキャプチャシステムを実現できる。ここで、小型軽量の装置でリアルタイムに空間位置を計測するという目的を実現するためには、2点間の空間方位をリアルタイムに計測可能な小型軽量のセンサが必要となる。センサの計測手法としては、機械的リンクから光を使う手法まで各種考えられるが、本目的は離れた2点間の計測であり、光を使う手法に限定する。

光を用いて空間方位を取得するための手法として、大きく分けて発光マークを用いない手法、発光マークを用いる手法の二つが考えられる。

発光マークを用いない手法としてコンピュータビジョンによるパターン計測手法が挙げられる。その一例として ARToolKit が挙げられる [1]。本システムはマークの空間位置姿勢に CG を重畳する用途において広く使われている。本手法ではマークに電源が必要ないことや、複数のパターンの空間位置情報を同時に取得することが可能であり、一般的なビデオカメラで実現可能であり、特殊な機材を必要としない利点がある。しかし、マークに当たる光やカメラ画像の明るさなどの条件変化に弱く、精度が不十分になる場合も多い。

次に、発光マークを使った手法には、点光源と高速

[†] 慶應義塾大学大学院, 横浜市

Graduate School of Media Design, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, 223-8526 Japan

^{††} Massachusetts Institute of Technology, USA

MIT Media Lab, Room E15-324, 20 Ames St, Cambridge, MA 02139, USA

^{†††} 電気通信大学大学院, 調布市

Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8285 Japan

^{††††} 東京大学大学院, 東京都

Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

^{†††††} 慶應義塾大学大学院, 横浜市/JST ERATO

Graduate School of Media Design, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, 223-8521 Japan

a) E-mail: nii@kmd.keio.ac.jp

受光素子を用いたシステム, 構造化光投影マーカを用いたシステムが挙げられる。

高速受光素子を用いたシステムは高速で高精度に位置情報を取得できることから, 各種のシステムが既に実用化されて市販されている [2]. この手法では, 少数のマーカを非常に高速に計測可能である. しかし, 複数のマーカに対応するためにはマーカの発光タイミングを時間分割制御することが必要で, フレームレートとマーカの本数はトレードオフの関係になってしまう。

また発光マーカと高速なカメラモジュールを用いたシステムも各種開発されており, 既にゲーム機などにも採用されている [3]. このシステムでは画像処理を用いて複数のマーカの判別が可能のため, 時分割駆動する必要はないが, 自由空間内の複数のマーカを判別するためには, マーカの形や発光パターンなどに工夫が必要である。

一方, 構造化投影マーカを用いたシステムとは, プロジェクタなどを用いて特別なパターンを空間に投影し, カメラや受光センサなどを用いてパターンを観測し, マーカであるプロジェクタの空間位置を取得する手法であり, 各種の手法が研究されている [4]. このうち, パターン投影部を工夫しプロジェクタのフレームレートの制限や解像度の制限を受けないシステムが提案されている. その一例として K. T. Palovuori らの研究が挙げられる. 光源の周りに円筒形状の M 系列の乱数マスクを配置し, 物理的に回転しながら空間にパターンを投影する送信部と受光部をもつ受信部から構成されており, 受光した時系列パターンの位相から方位情報を取得する [5]. この手法では正確な時間相関を求めることにより高い分解能を実現可能である. しかし, 送信側には機械的回転機構があること, 受信側の計測時間は送信側のパターンが機械的に 1 回転する時間分必要であり, 正確に時間相関を求めるためには精密な機構が必要となる点が問題である。

機械的な手法ではなく電子的に投影パターンを切り換える提案手法としては Ramesh らの Prakash システム [6] が挙げられる. その概要を図 1 に示す. 複数の位置情報を取得する場合にもフレームレートは一定で, 1 kHz という高いフレームレートで方位角情報を取得可能である. このシステムでは送信部 (パターン投影部) と受信部 (受光部) から構成され, 送信部は対称型グレイコードのパターンをもつ複数のスライドマスクと対応する光源 (図では 4 bit 分) を同一直線上に配置した構造である. その各光源を時分割駆動し,

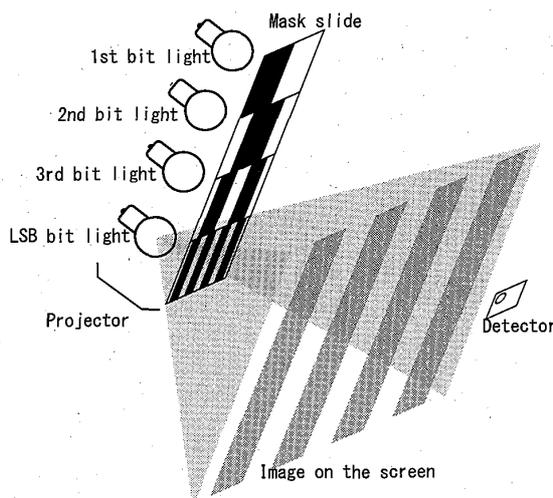


図 1 Prakash プロジェクタシステム
Fig. 1 Prakash projector system.

空間中に複数のグレイコードパターンを投影することにより, 異なる方位角にそれぞれ別の座標情報を明滅情報として投影している. 一方受信部は場所によって異なる明滅情報を受信し, その時系列信号を復調することにより位置情報を復元できる。

本手法において, 位置分解能を向上するためには投影用スライドマスクを更に高い分解能で構成し, 複数のマスクを光学的に高精度に配置する必要がある. 現在の分解能は 8 bit から 10 bit 程度であるが, より分解能を向上させるためには高い印刷精度で作られたマスクと, 強固なきょう体が必要となるため, 構造が大型化, 複雑化してしまう. つまり, この問題は複数の高精度マスクを正確に配置するのが難しいことが原因である。

そこで本論文では, スライドマスク 1 枚のみで位置分解能を向上可能な投影型空間エンコーダシステムによる空間位置検出手法を提案する. スライドマスクをシングルトラックグレイコードにより構成することにより, 1 枚のマスクで複数のパターンと同等の機能をもつシステムを実現できる. 更にレンズを用いていないことから, 非常に小型軽量のシステムを構成することが可能となる. まず 2. においてシステムを提案し, 次に 3. において実装し実験を行う. 最後に 4. でまとめとする。

2. 提案手法

提案する投影型空間エンコーダシステムに用いた基本手法は回転検出型絶対値エンコーダの仕組みを空間の方位角検出のために拡張したものである. 最初に提

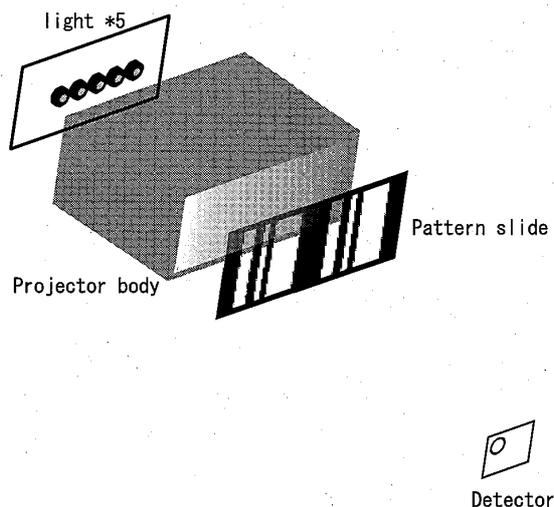


図2 STGC プロジェクタシステム
Fig.2 STGC projector system.



図3 パターンズライド 5bit 分解能 (左), 7bit 分解能 (右)
Fig.3 STGC mask pattern of 5 bit resolution (left), 7 bit resolution (right).

案手法の概要を述べ、その後回転検出型エンコーダと比較した後、本手法を実現するための本質的要素であるパターンズライドの構成及び設計について述べる。

2.1 システム構成

投影型空間エンコーダシステムは空間に位置情報を投影する送信部、その情報を取得する受信部から構成されている。それぞれの位置関係を示す模式図を図2に示す。送信部は複数の光源とパターンズライドから構成され、受信部は受光素子及びマイコンから構成されている。

送信部の複数の光源はビット分解能と同じ数のLEDを等間隔に配置しており、その配置条件は次節で述べる。使用するパターンズライドは図3で示すような2値パターンをもち、光を透過・遮へいする特性をもつ。このパターンには次節で説明するシングルトラックグレイコードを用いており、送信部から複数のグレイコードパターンを投影することができ、角度によって異なるコードを送出することとなる。一方受信部は、受光素子とマイコンから構成されており、すべての光源との遮へい関係を計測する。位置情報取得手順は以

下のとおりである。

1. 最初に光源の内の一つのみが発光する。点光源からの光は前面のSTGCマスクによって遮られ、透明部を透過した光が受信部に向かう。
2. マスクに遮へいされなかった光は受光部で検出される。
3. 次々に隣接する光源が点灯し、マスクを透過した光を受信し、必要なbit数のデータを取得。
4. データはSTGCコードになっているため、これをバイナリーに変換することにより、位置情報となる。

また、上記に述べた受光部と光源を入れ換えたシステムも同様に実現可能である。図中左側のスライド後方に光源側に置いたシステムをプロジェクタ型、スライド後方に受光部に置いたシステムを高速カメラ型と呼ぶ。

(1) プロジェクタ型

上記の説明のとおり、プロジェクタから投影し、受信部で受光を行う。一般的な投影型プロジェクタと同様に、送信部から複数のマスク情報を投影する。本方式では、受信部は受光素子一つで位置情報を取得できるため、数多くのデバイスが自己位置情報を取得する場合に有用である。

(2) 高速カメラ型

高速カメラ型においては今まで受信部と呼んでいた外部に光源を内蔵し、今まで送信部と呼んでいた本体にマスクと後方に配置した複数の受光部を内蔵し、方位により異なる光情報が受光部に到達するシステムである。この受光情報から、光源の位置を推定可能である。高速カメラ型においては、パターンを複数回投影することなく、光源が一度点灯することにより一つの光源の位置を確定できる。そのため、少数ポイントの位置を高速に取得する用途に有用である。

また、本システムで実現できる機能はパターンマスクをもつきょう体と外部の点における1軸角度情報の取得である。取得できる角度軸は、図3のマスクに対して水平方向の移動に対してである。一方、垂直方向の移動に対しては取得できる位置情報は変化しない。そのため、二次元以上に拡張する場合には、パターンマスクが縦横となるように2台のきょう体を組み合わせることで、X軸、Y軸に関する情報を2台のきょう体から取得できる。更に、X軸上に離れたところにもう1台のきょう体を組み合わせることで、外部の点を見込む角度を取得することにより、奥行情報も取得できる。これにより、三次元計測も可能となる。

ここで、本システムを組み合わせる用いる場合に

論文/STGC (シングルトラックグレイコード) を用いた投影型空間エンコーダ

は、多重化が必要となる。その手法として、同時使用が考えられる場合には周波数多重化により光源の点滅周期を異なる値に設定することで同時使用が可能である。また、間欠使用の場合には発光装置に光トリガ受信の受信部を付加することにより、光トリガ受信後 $100\ \mu\text{s}$ 後に点灯、 $200\ \mu\text{s}$ 後に点灯、というような構造をとることにより、複数台の光源を簡単な同期装置のみで使用できるようになると考えられる。

また、本システムは小型の手持ちの装置などに内蔵することを想定し、大きさとしては例えば1軸当り $10\ \text{mm}$ の立方体であり、これを3個並べるような構造で、周囲 $0.5\ \text{m}$ 以上 $1.5\ \text{m}$ 程度の範囲の三次元的な動きを計測することが考えられる。アプリケーションとしては、従来のスタジオのモーションキャプチャというよりは歩いている人の腕の位置や指さしの方向を検出することにより、歩きながらでは使いにくい、マウスやタッチによるオペレーションを置き換えるような動作を想定している。

分解能に関しては、既に文献 [6] で $12\ \text{bit}$ による計測が行われている。しかしながら文献 [6] の手法では非常に正確なマスク取付け精度やきょう体と、マスク、レンズの3者の取付け精度が必要である。一方、本提案手法ではレンズを使うことなく、マスクも1枚だけなので、マスクときょう体の測定したい角度さえ注意して接合することで、キャリブレーションにより必要な精度を出すことができる点が簡単に小型の製品の実現につながる。

2.2 シングルトラックグレイコード

一般的絶対値ロータリエンコーダの構造は図4のようにグレイコード形式の複数のトラックをもつ回転板型パターンズライドとパターンのコードを読み取るセンサをもち、原点からの絶対回転量を出力する回転角

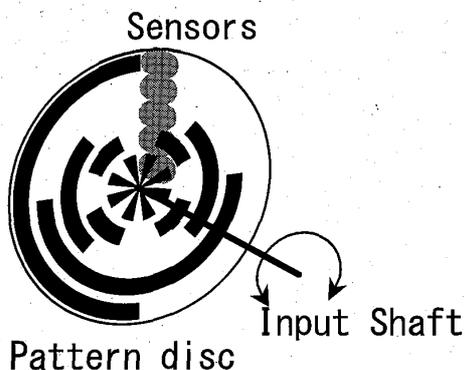


図4 5 bit 絶対値ロータリエンコーダ

Fig. 4 5 bit resolution absolute rotary encoder.

度計測装置といえる。図4の形式では五つのセンサと5bitの対称型グレイコードを5トラックに描画したパターンズライドから構成されている。グレイコードとは Gilbert らによって発明された、ミスコードを発生しない巡回カウンタを実現するための特別な2進数と考えることができる [7]。1周を32分割 (5bit分解能) した回転角度信号を出力可能である。高精度なシステムではより多くのグレイコードトラックがスライドに印刷されており、その各トラックの印刷精度や各トラックを読み取るセンサに高い位置精度が必要となる。

この問題を改良したシステムが Hiltgen らによって提案 [8] されたシングルトラックグレイコード (以後 STGC と呼ぶ) 型絶対値エンコーダである。この方式では1トラックのグレイコードだけを用いて原点からの絶対回転量を出力する。従来方式で問題となった複数マスク間の印刷精度は、1トラックで実現しているため影響ない。模式図は図5のように等間隔に配置された5組のフォトインタラプタと1トラックのシングルトラックグレイコードパターンから構成されている。本エンコーダは1周を30分割した角度信号を出力可能である。

ここで、シングルトラックグレイコードによるコードの導出法を述べる。コード長を n と表記し、まず $n = 3$ において導出を行う。一般的な対称型グレイコードは

$$[000, 001, 011, 010, 110, 111, 101, 100]$$

で表すことができ、これを実際のエンコーダに実装するトラックに書き込む形式を行列 S と表し、以下に表すとする。

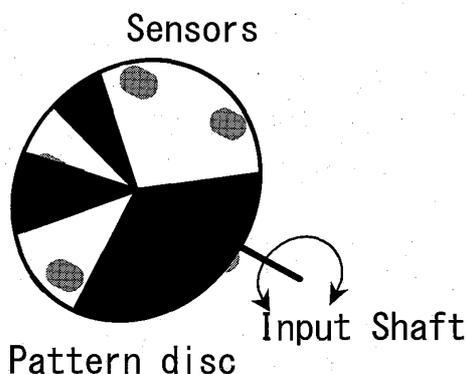


図5 分割数30のSTGC型ロータリエンコーダ

Fig. 5 30 resolution Single-Track-Gray-Code rotary encoder.

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

このコード行列 S から 1 行単位 S_k で取り出し絶対値エンコーダの各トラックに印刷することで、絶対値エンコーダとして機能する。

同様に $n = 3$ におけるシングルトラックグレイコードは文献 [9] より $[g_0 g_2 g_4][g_1 g_3 g_5]$ という Seedcode で表すことができ、実際のエンコーダに実装するトラックに書き込む形式で記述すると以下ようになる。

$$S = \begin{bmatrix} g_5 & g_4 & g_3 & g_2 & g_1 & g_0 \\ g_1 & g_0 & g_5 & g_4 & g_3 & g_2 \\ g_3 & g_2 & g_1 & g_0 & g_5 & g_4 \end{bmatrix}$$

次に文献 [9] より実際の値 $[001][011]$ を代入し次式で示す。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

このコードは通常のグレイコード条件を満たした上に、位相を巡回させる変換を $C(g_0, \dots, g_5) = (g_4, g_5, g_0, \dots, g_3)$ と定義し用いることで以下の式が成り立つ。

$$S_2 = C(S_1) = C(C(S_0))$$

つまり、各行ごとに位相だけが異なる同一データであるシングルトラックグレイコードであることが確かめられる。

次に STGC は巡回コードであることから p を Seedcode 長とおく場合、 $len = n \times p \leq 2^n$ を満たすなるべく大きな p を見つける必要がある。文献 [9] より最大コード長は対称型グレイコードより小さな値になることが分かっている。なぜなら $[000]$ といった左右対称のコードは位相を巡回させても同一コードになり、使用不能であるためである。

ここで、文献 [9] における Seedcode にはいくつかの自由度が存在する。そのため、Seedcode を用途に合わせて選択する手法を以下に述べる。本研究において、プロジェクタのマスクスライドに応用する場合、印刷精度や光の回折の問題があることから、スリットの間隔がなるべく広がるグレイコードが望ましい。そこで、文献 [9] に掲載されているシングルトラックグレイ

コードを最適化する。手法としては、Seedcode を使って行列 S を作り、その行と列を入れ換え、最適化する。文献 [9] より、2 行を入れ換えてもグレイコード条件を満たすならば、STGC 条件を常に満たすこと、また、Seedcode の最初と最後のコードが変化しない範囲において、異なる 2 列を入れ換えても STGC 条件を常に満たすことは明らかである。そこで、上下、左右に $1/0$ の変化点が最小になるように入れ換える。これにより、エンコーダで用いるのに適したコードを得ることができる。

2.3 パターンズライド設計

回転型エンコーダにおいては、パターンズライドは同心円状に配置されているため、パターンの両端同士は隣接している状態となる。また、トラックを読み取るセンサについては同心円状に等間隔に配置されているため、パターンの終端を超えた状態においてもパターン 1 周期に対する位相を検出可能であり、絶対回転角に変換可能である。

一方、本手法においては、パターンズライドを平面に配置する。また、パターンを読み取るセンサについても光源、受光部に分離し、光源のみをパターンズライドの後方に直線状に配置する。受光部は送信部から離れた所におく。その原理図を図 6 に示す。図中使用している変数を説明する。

w : パターンの幅 (mm)

f : パターンから光源までの距離 (mm)

d : 光源同士の間隔 (mm)

m : パターンの分解能

n : 光源数

L : 投影されるパターンの投影幅

$light(k)$: ライトの番号

z : パターンからスクリーンまでの距離

z_1, z_2 : パターン投影範囲の距離

図中 $light(1)$ から $light(n)$ が光源を表しており、その下に幅 w のパターンズライドが配置されている。そのパターンには m に分割された STGC コードが描画されている。光源からの光はパターンを経由し、受光点に到達し、そのときの光源までの遮へい関係によって位置情報を示す。図中 o, p, q, r の 4 点で囲まれた範囲において、光源までの遮へい関係が変わらないことを示しており、同一のグレイコードを取得するこ

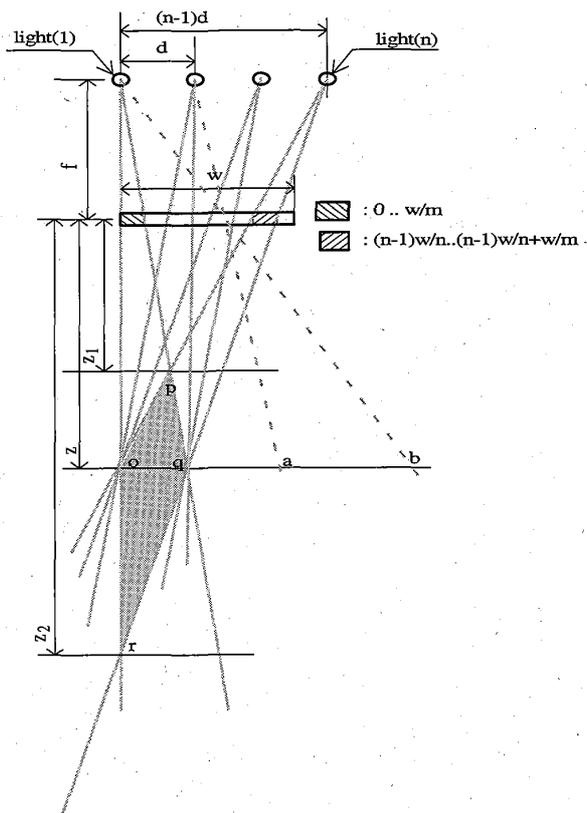


図 6 スライド配置及びコード投影範囲
Fig. 6 Pattern diagram of projection area.

とになる。また、この範囲を超えることにより異なるグレイコードを取得できることが推察できる。

次に、回転型においてはパターンの終端を超えた場合でも位相を検出できるが平面型では終端で位相情報が途切れてしまう。そのため、位相情報が途切れないようパターンを繰り返す必要がある。図より計測するために必要な1周期分のパターンに加えて、パターンズライドにおける光源の両端幅 $\frac{n-1}{n}w$ 以上の繰返しが必要となる。以上のことから、マスクの幅はシングルトラックグレイコード $\frac{2n-1}{n}$ 周期分以上必要となる。

次に n ビットのシングルトラックグレイコードマスクを配置し、その STGC コードがどのようにスクリーン面に投影されるかを MATLAB を用いて検討した。

光源の位置とマスクの位置関係については図 7 上のようなになる。上から、三つの光源、光を遮へいする 3bit の STGC のマスクパターンが配置されている。三つの光源からの光はそれぞれ図下の三つの図の光線群で表せる。この光線群をスクリーンへの投影している光線の位置を図 8 に示す。設置した場合の、幾何的な光の広がり方を示している。図の下辺がスクリーンの位置と仮定する。この図より、下辺には STGC コー

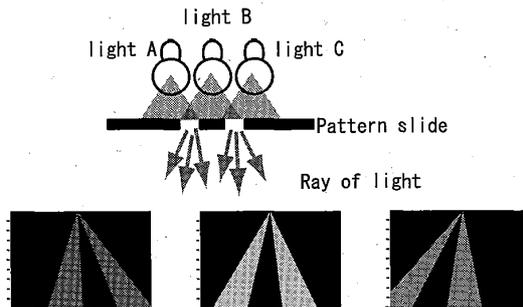


図 7 3 bit マスクに個別に投影した様子
Fig. 7 Pattern diagrams of 3 bit slidemask with one light source.

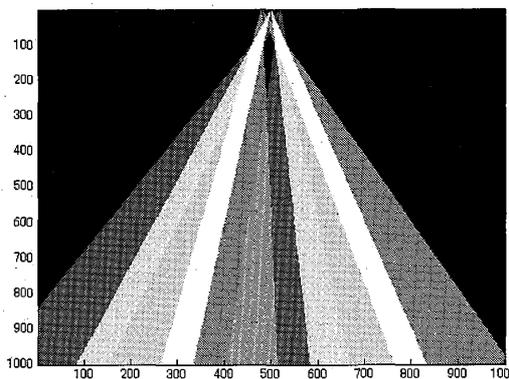


図 8 3 bit マスクに同時に投影した様子
Fig. 8 Pattern diagram of 3 bit slidemask with three light sources.

ドが投影されていることが確認できる。5, 7bit についても同様にコードを投影可能なことを確認している。

2.4 コード投影距離

実際に投影距離、パターンズライドの寸法、分解能を決めた場合の、光源とパターンズライドの距離の算出方法を述べる手順で設計手法を記述する。

最初に必要分解能を決定する。必要分解能以上のグレイコードのビット分解能を文献 [9] から求め、パターンの分解能 m と光源数 (グレイコードの bit 数) n を決定する。次にパターンの幅 w と光源同士の間隔 d と、投影距離 z を決定すると、パターンから光源までの距離 f が算出可能である。ここで光源からパターンズライド幅に広がる光は距離 z 上のパターン全体の投影幅を L と表記すると $\frac{L}{z+f} = \frac{w}{f}$ と表せる。また、本システムが有効に働くためには、複数光源から投影した光がパターンを経由して距離 z 上の一点で、パターンの位相差が $2\pi/n$ だけ離れた関係になる必要がある。パターンの位相差が $2\pi/n$ となるためには実際に L/n だけ離れている必要がある。つまり、 $\frac{L}{z} = \frac{d}{f}$ の関係があり、この二つの L に関する式から f を求めると

以下の式となる。

$$f = z \frac{nd - w}{w}$$

次に位置情報が正しく届く距離範囲を求める。

図 6 はスクリーンからの距離 z に向けて投影した場合、受信部がすべての光源からの光を受光可能な領域を示している。各線は各光源からパターンライドを通り、受信部に向かう光線を表している。スクリーンまでの距離 z においては正しい位相関係をもったパターンを投影できるが、距離が近い部分においては、パターン位相が変化することが読み取れる。同様に距離が遠くなる部分でもパターンが変化する。そのため投影範囲は図中の $[z_1, z_2]$ の範囲となる。

2 光源 $light(1)$ と $light(n)$ の光線がパターン上の 1 ブロックを通過し、正しいグレイコードパターンを提供できるのは図中 $opqr$ で示す範囲である。ただし、以下の式では $light(1)$ とマスクの左端を結ぶ線を基線とする。マスクから z_1 の距離で、 $light(1)$ と $light(n)$ の光が交差する点 p を求める。

$$z_1 = (n-1) \frac{df}{\frac{w}{m} + (n-1)d - \frac{n-1}{n}w} - f$$

次にマスクから z_2 の距離で、 $light(1)$ と $light(n)$ の光が交差する点 r を求める。

$$z_2 = (n-1) \frac{df}{(n-1)d - (\frac{n-1}{n} + \frac{1}{m})w} - f$$

以上のようにして、プロジェクタのパターン投影の有効範囲を与えられる。この式より、マスク幅 w が光源の幅 $(n-1)d$ に近づくとつれて、投影距離と投影可能最短距離、最長距離の比を被写界深度を z_2/z_1 と表すと動作領域が広がる傾向がある。その様子を図 9 に示す。本グラフでは $n = 7$ [bit], $d = 1.0$ [mm], $f = 100$ [mm] と仮定した場合における、マスクの幅を変化させた場合の投影距離、つまり焦点距離と焦点深度を示したものである。

ただし、動作範囲が広がるにつれて、各パラメータの感度が高くなり、誤差が大きくなると考えられる。

次はマスクのスリット幅と回折の関係である。マスクの裏から光が入り、光の通るスリット幅と波長によってフラウンホーファー回折パターンを発生する。これが、受光部までに到達するまでに光が広がるか検討する。マスクの最小幅は $\frac{w}{m}$ 、使用する波長を $\lambda = 0.94$ (μm) とするとゼロ点の位置は以下の式で表せる。

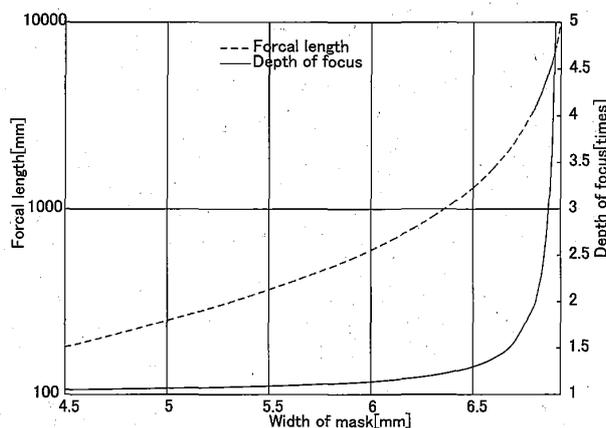


図 9 マスク幅と焦点距離及び焦点深度の関係
Fig. 9 The relation width of mask to focal length.

$$\frac{x}{z} = \pm \frac{\lambda}{w}$$

この値から、実際の使用範囲での値を検討する。

3. システムの実装と評価

2. の手法でマスクを設計し実際のプロジェクタを試作した。本システムは高速カメラ型である。主なパラメータを $n = 7$, $d = 7.62$ mm, $f = 100$ mm, $z = 540$ mm と設定し、設計を行った。その結果 $w = 45$ mm, $z_1 = 509$ mm, $z_2 = 573$ mm と求められた。この試作システムは、図 10 のように大きく光源部と位置検出装置の二つから構成される。光源部は赤外線 LED (Vishay 社 TSMF3700) と制御用マイコンから構成されており、長さ $100 \mu\text{s}$ 、周波数 455 kHz の赤外線バースト波を 1 秒当たり 100 回送信している。

一方、位置検出器本体は図 11 に示すように、透明ポリエステルシートに STGC パターンを印刷したマスク、受光センサ (Vishay 社 TSOP7000) が 8 個、ピンホールマスク、制御用 PIC マイコンボードから構成されている。受光センサは 455 kHz の周波数のみに高い感度をもつリモコン受信用素子である。試作機ではマイコンを用いて、STGC コードを受信し、それをパソコンに USB ケーブルで転送、Windows 上でデコードを行い、位置情報を画面に表示している。受光センサの配置位置について、7 個についてマスクの後方に配置し STGC を受信するために使用し、残り 1 個はきょう体外部に配置し光源発光タイミング受信用に使用している。また、ピンホールマスクは正確な受光位置からの光のみを受信できるように受光素子の直前に配置している。本体はレンズ等は一切使っていない。

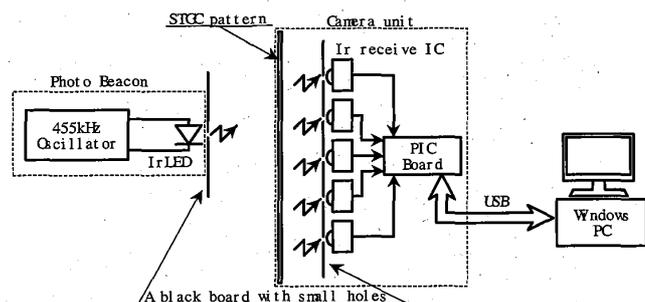


図 10 試作システムのブロック図

Fig. 10 The block wiring diagram of our system.

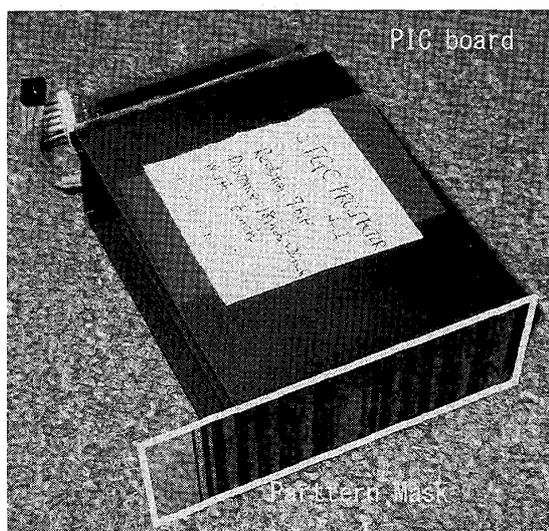


図 11 プロジェクタ本体外観

Fig. 11 The overview of projector body.

いため、非常に軽量である。ここでは、高速カメラ型の試作を行ったが、プロジェクタ型であっても、送受信に必要な光量等は同一のため、本システムと同様の設計方法で設計が可能となる。その場合には、正確な位置からの光のみが放射されるようにピンホールで制御されることになる。フレームレートについては現在 100 Hz であるが、最高 20 kHz まで同一手法で実現できる。20 kHz という値は使用しているリモコン受信素子の反応時間と、通信ソフトウェアの処理時間に由来する。そのため、使用素子を変更することにより、LED、フォトダイオードの反応時間、つまり 100 MHz オーダまでフレームレートを向上できると考えられる。

3.1 システムの評価

次に提案システムを用いて、光源の位置とセンサからの変異量を測定した。光源 LED を 1 軸リニアスライダ (安川電機 LINEARSERV) に取り付け、一定速度で並進移動をさせながら、センサ出力を記録した。そのデータより位置と受信データの関係を示したデー

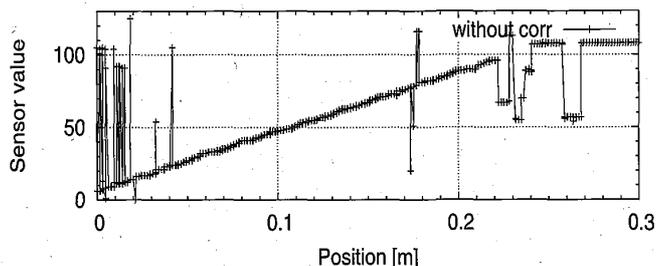


図 12 測位位置と測定値の関係

Fig. 12 Position data and measured value relationship with 7 bit projector system.

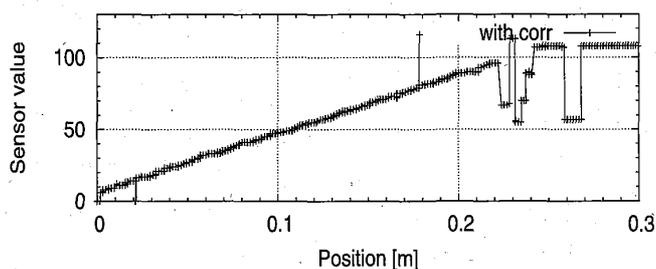


図 13 補正後波形

Fig. 13 Output value of 7 bit projector system with error correction.

タを図 12 のグラフに示す。このグラフでは横軸は光源の位置、縦軸はセンサより取得した計測値を示す。この図より、光源の位置とセンサの値は比例していることが確認できる。しかし、両端においては非連続な値が多数計測されている。この理由として、光源の光量を正面にセンサを配置したときに適するように設定したが、両端においては、光量が変化し、センサにとり不十分な光量になった可能性が考えられる。また、スパイク性のノイズが発生していることが分かるが、本データでは一切フィルタ処理を行っていないためであると考えられる。

このうち、スパイク性ノイズの除去はフィルタにより可能であるため、受信部にフィルタ挿入を検討した。計測を連続的に行う条件では、前回のデータと近い値をとると考えられるため、計測範囲を限定する手法が考えられる。値が近い範囲ではそのままデータを出力し、急に値が外れた場合、2 回計測したグレイコードが同一か、1 だけ違う状態になるまで出力データを更新しないようなフィルタを構成してみた。そのフィルタによる補正後の波形を図 13 に示す。

このようにフィルタによる補正を行うことで、より正確な位置データを取得することができることが確認できた。

4. むすび

本研究においては位置情報を単純な仕組みでリアルタイムに取得するために、空間に光の明滅パターンを投影する投影型空間エンコーダを提案しその実現について検討を行った。空間に投影するパターンとして、シングルトラックグレイコードを利用することで、従来複数必要であったマスクパターンを1枚だけで、同様の機能を提供できることを示した。

その検討結果を用い、レンズを用いない単純な構成により投影型空間エンコーダの試作を行った。この試作機は7ビット分解能をもち、実験により空間位置情報をエンコード・デコード可能なことを確認できた。今後は分解能の向上及び、ユーザの手の位置やデバイスとの位置関係を取得するインタフェースシステムを実現を検討している。

文 献

- [1] H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system," (IWAR '99) Proc. 2nd IEEE and ACM Int'l Workshop on V.R., pp.85-94, 1999.
- [2] OPTOTRAK, NDI Optotrak Certus Spatial Measurement, <http://www.ndigital.com/certus.php>, 2007.
- [3] Nintendo Wii, <http://www.nintendo.co.jp/wii/>, 2006.
- [4] R. Raskar, P. Beardsley, J.v. Baar, Y. Wang, P. Dietz, J. Lee, D. Leigh, and T. Willwacher, "RFID lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors," ACM Trans. Graphics, vol.23, no.3, pp.406-415, 2004.
- [5] K.T. Palovuori, J.J. Vanhala, and M.A. Kivikoski, "Shadowtrack: A novel tracking system based on spread-spectrum spatio-temporal illumination," Presence: Teleoperators & Virtual Environments, vol.9, no.6, pp.581-592, Dec. 2000.
- [6] R. Raskar, H. Nii, B. de Decker, Y. Hashimoto, J. Summet, D. Moore, Y. Zhao, J. Westhues, P. Dietz, J. Barnwell, S. Nayar, M. Inami, P. Bekaert, M. Noland, V. Branzoi, and E. Bruns, "Prakash: Lighting-aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators," ACM Trans. Graphics, vol.26, no.3, pp.36.1-36.10, 2007.
- [7] E. Gilbert, "Gray codes and paths on the n-cube," Bell Syst. Tech. J., vol.37, pp.815-826, 1958.
- [8] A.P. Hiltgen, K.G. Paterson, and M. Brandestini, "Single-track gray codes," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.42, no.5, pp.1555-1561, 1996.
- [9] M. Schwartz and T. Etzion, "The structure of single-track gray codes," IEEE Tans. Inf. Theoly, vol.45, no.7, pp.2383-2396, 1999.

(平成 21 年 2 月 4 日受付, 5 月 19 日再受付)



新居 英明 (正員)

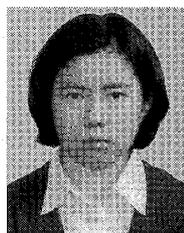
2003~2006 電気通信大学大学院博士課程後期課程在籍。2006 より東大大学院情報理工学系研究科助教。2008 博士 (工学) 取得。2009 より慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師。



Ramesh Raskar

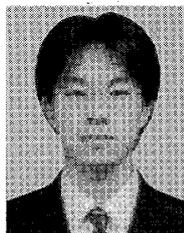
Ramesh Raskar is an Associate Professor at MIT Media Lab and leader of Camera Culture group. He received his PhD at U of North Carolina at Chapel Hill and was a Senior Research Scientist at Mitsubishi Electric Research

Lab in Cambridge, MA.



藤井 智子

2009 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻了。2009 (株)セガ入社。



常盤 拓司

2001 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程了。2001~2007 同博士課程在籍。産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター特別研究員。日本科学未来館科学技術スペシャリストを経て、現在、東京大学大学院工学系研究科特任研究員。実世界指向のインタフェースの研究開発に従事。



稲見 昌彦

1999 東京大学大学院工学研究科博士課程了。博士 (工学)。東京大学リサーチ・アソシエイト、同大学助手、電気通信大学講師、同大学助教授、同大学教授、JST さきがけ研究者、MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者を経て現在、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。