

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
3. Januar 2003 (03.01.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/001237 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G01S 5/16**

[DE/DE]; Dr.-Gustav-Knodel-Strasse 8, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen (DE). **ABDELMALEK, Latifa**
[TN/DE]; Hirschstrasse 18, 76133 Karlsruhe (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/06384

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. Juni 2002 (11.06.2002)

(74) **Gemeinsamer Vertreter: FORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE GMBH**; Stabsabteilung Marketing,
Patente und Lizenzen, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
(DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) **Bestimmungsstaaten (national)**: JP, US.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(84) **Bestimmungsstaaten (regional)**: europäisches Patent (AT,
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, SE, TR).

(30) **Angaben zur Priorität**:
101 30 423.4 23. Juni 2001 (23.06.2001) DE

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
GMBH** [DE/DE]; Weberstrasse 5, 76133 Karlsruhe (DE).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe
der PCT-Gazette verwiesen.

(72) **Erfinder; und**

(75) **Erfinder/Anmelder (nur für US): HEMPEL, Eckhard**

(54) **Title**: OPTICAL 3D POSITION MEASURING SYSTEM FOR SIMULTANEOUSLY DETECTING SIX DEGREES OF FREEDOM

(54) **Bezeichnung**: OPTISCHES 3D-POSITIONSMESSSYSTEM FÜR DIE SIMULTANE ERFASSUNG VON SECHS FREIHEITSGRADEN

(57) **Abstract**: The invention relates to an optical position measuring system for detecting six degrees of freedom in a three-dimensional area. Said system consists of a measuring sensor, an identifying mark, an illumination system and a control unit. The aim of the invention is to design one such optical position measuring system in such a way that it is insensitive to disturbances and is suitable for using in narrow spaces. This objective is achieved by means of a surface image sensor in the form of a measuring sensor, by a shadow-casting structure fixed over said sensor and used as an identifying mark, by a certain number of light sources used as an illumination system, preferably light-emitting diodes of great light-transmitting capacity, and by a control unit comprising an image processing system having an implemented mathematical model and an associated mathematical evaluation algorithm and used to determine the position of the mobile object, and a trigger circuit for controlling the light sources in a continuous or clocked manner, and for detecting the corresponding shadow images on the CCD sensor chip in a continuous or clocked manner.

(57) **Zusammenfassung**: Optisches Positionsmesssystem für die Erfassung von sechs Freiheitsgraden im dreidimensionalen Raum, bestehend aus einem Messaufnehmer, einer Erkennungsmarke, einer Beleuchtung sowie einer Steuerungseinheit. Aufgabe ist die Gestaltung des optischen Positionsmesssystems in der Art, dass es unempfindlich gegen Störungen ist und es sich für einen Einsatz in beengtem Raum eignet. Die Aufgabe wird mit einem Flächenbildsensor als Messaufnehmer, einer über diesem fixierten schattenwerfenden Struktur als Erkennungsmarke, einer bestimmten Anzahl von Lichtquellen als Beleuchtung, vorzugsweise lichtstarke Leuchtdioden, sowie mit einer Steuerungseinheit, welche eine Bildverarbeitung mit implementiertem mathematischem Modell und einem dazugehörigen mathematischen Auswertalgorithmus zur Ermittlung der Lage und Position des bewegten Objekts, eine Triggerschaltung für die laufende oder taktweise Ansteuerung der Lichtquellen sowie für die laufende oder taktweise Aufnahme der entsprechenden Schattenbilder auf dem CCD-Sensorchip enthält, gelöst.



WO 03/001237 A2

- 1 -

Optisches 3D-Positionsmesssystem für die simultane Erfassung von sechs Freiheitsgraden

Die Erfindung betrifft ein optisches dreidimensionales Positionsmesssystem (3D-Positionsmesssystem) für die simultane Erfassung von sechs Freiheitsgraden gemäß den kennzeichnenden Teilen der Patentansprüche 1 und 5.

Die Erfindung befasst sich mit dem Problem der berührungslosen Lagebestimmung von bewegten Objekten, welche sich in einem dreidimensionalen Raum mit sechs möglichen Freiheitsgraden, nämlich mit drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgraden bewegen.

Einsatzmöglichkeiten bieten sich u. A. im Bereich der Robotik und bei der Gerätepositionierung von Geräten in der Medizintechnik, wobei eine zuverlässige und genaue Lagebestimmung der zuvor genannten Art insbesondere bei einer Automatisierung eine absolut notwendige Bedingung ist. Mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit des bewegten Objekts steigt zudem die Bedeutung, dass alle sechs Freiheitsgrade möglichst simultan erfassbar sind.

Optische Positionsmesssysteme bestehen meist aus einer Steuerungseinheit, einer oder mehreren Messaufnehmern sowie Erkennungsmarken, welche auf dem bewegten Objekt aufgebracht sind. Für eine Lagebestimmung werden die oder der Messaufnehmer auf die Erkennungsmarken ausgerichtet, wobei diese durch den Messaufnehmer mit Hilfe der Steuerungseinheit detektierbar sind. Dabei ermittelt die Steuerungseinheit des Positionsmesssystems die Koordinaten und die Orientierung des Objekts im dreidimensionalen Messraum und ermittelt bei einer Bewegung des Objekts quantitativ dessen Relativbewegung.

In DE/EP 1034440 T1 wird ein berührungsloses Positionsmesssystem beschrieben, bei dem mindestens drei Erkennungsmarken nahe beieinander eine zweidimensionale Struktur aufspannend auf dem bewegten Objekt angebracht sind. Die Erkennungsmarken sind Marker, welche mit separaten Lichtquellen angeleuchtet, mit Hilfe mehre-

- 2 -

rer Kameras als Messaufnehmer laufend verfolgt werden, welche wiederum die Messdaten an eine Steuerungseinheit weiterleiten. Bei diesem Positionsmesssystem sind somit in vorteilhafter Weise keine elektrischen Anschlüsse an das bewegte Objekt erforderlich. Jedoch sind mehrere Lampen und mehrere Kameras ortsfest neben dem bewegten Objekt zu positionieren und gegen jegliche Verschiebungen zu sichern.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur optischen Positionsmessung eines bewegten Objektes in einem dreidimensionalen Raum anzugeben, welches einerseits unempfindlich gegen äußere Störungen, insbesondere mechanischer Art, andererseits als 3D-Positionsmesssystem sich bereits vom Grundaufbau her für einen Einsatz in sehr beengtem Raum eignet. Dabei sollen alle Bewegungen des Objekts in allen sechs möglichen Freiheitsgraden zeitgleich und fortlaufend messbar sein und für die Ermittlung der Positionsdaten zur Verfügung stehen.

Die Aufgabe wird mit einem Positionsmesssystem gelöst, welches in Analogie zu einer Sonnenuhr den Schattenwurf speziell einer auf dem bewegten Objekt abstehend aufgebrauchten Struktur als Erkennungsmarke zur Positionsmessung ausnutzt.

Das Messprinzip basiert darauf, dass der Schatten der abstehenden Struktur als Erkennungsmarke auf dem Flächenbildsensor als Messaufnehmer in Größe, Form und Position laufend oder taktweise für eine weitere Verarbeitung detektiert wird. Daraus sowie aus der bekannten Position von mindestens drei, nicht in einer Linie angeordneten Lichtquellen, idealerweise Punktstrahler, welche die Struktur aus verschiedenen Richtungen simultan oder hintereinander anstrahlen, wird in einer dem Flächenbildsensor nachgeschalteten Steuereinheit mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus die Lage und die Ausrichtung der Struktur und damit des bewegten Objekts, auf dem die Struktur und der Flächenbildsensor fixiert sind, im Raum berechnet. Die drei für einen Messvorgang heranzuziehenden Lichtquellen müssen dabei so ortsfest im dreidimensionalen Raum angeordnet sein, dass die Schattenbilder der

- 3 -

Struktur von jeder der drei Lichtquellen vollständig auf dem Flächenbildsensor abgebildet sind. Sollen größere laterale oder Rotationsbewegungen erfassbar sein, müssen zu Sicherstellung der zuvor genannten Bedingung eine entsprechende Anzahl von Lichtquellen im dreidimensionalen Raum positioniert sein. Die Ausgabe der Positionsdaten erfolgt als Koordinatensatz.

Zusätzlich um das bewegte Objekt aufgestellte ortsfeste Kameras sind somit nicht mehr erforderlich. Die Anordnung des Flächenbildsensors direkt unter, d. h. in unmittelbarer Nähe der schattengebenden Struktur bewirkt zudem in besonders vorteilhafter Weise, dass der mit dem Objekt und der schattengebenden Struktur verbundene Flächenbildsensor im Vergleich zu einer ortsfesten Bilderfassung für eine ausreichende Erfassungsgenauigkeit nur ein relativ geringes Auflösungsvermögen mit wenig Reserven aufweisen muss. In Folge dessen kommt die anschließende Bildauswertung mit einer erheblich geringeren Anzahl von Bilddaten aus, was einerseits die Auswertungsgeschwindigkeit erhöht, andererseits Aufwand und Kosten der erforderlichen Hardware im Vergleich zu den eingangs genannten kameragestützten Systemen erheblich reduziert.

Als Flächenbildsensor eignet sich aufgrund der geringen Bauform und des ausreichenden Auflösungsvermögens insbesondere ein Kameramodul in Form einer Fotodiodenmatrix (CCD- oder PSD-Sensorchip). Die Steuereinheit besteht einerseits aus einer Bildverarbeitung mit implementiertem mathematischem Modell und einem dazugehörigen mathematischen Auswertalgorithmus zur Ermittlung der Lage und Position des bewegten Objekts und andererseits aus einer Triggerschaltung für die Ansteuerung der Lichtquellen sowie für die Aufnahme der entsprechenden Schattenbilder auf dem Flächenbildsensor. Dabei bietet sich in Anbetracht der relativ zu anderen Systemen geringen zu verarbeitenden Bilddatenmenge der Einsatz einer kompakten Steuerungseinheit, möglichst direkt unter dem CCD-Sensorchip auf dem bewegten Objekt, gerade zu an. Für die Übertragung der Koordinaten in Form von Koordinatensätzen zu einer weiteren Verarbeitung außerhalb des 3D-Messsystems

- 4 -

ist, wenn dies nicht drahtlos über Funk-, Ultraschall- oder Infrarotsignale geschieht, über ein einfaches Datenkabel.

Die Geometrie der schattengebenden Struktur ist dabei so zu wählen, dass die für die Bestimmung von Position und Ausrichtung des Objekts im dreidimensionalen Raum möglichst geringe, jedoch ausreichende Anzahl von Parametern eindeutig und möglichst exakt messbar sind. Diese Parameter fließen als Messgrößen in einen mathematischen Algorithmus ein, welcher wiederum für eine Berechnung der Position des Objekts in Echtzeit möglichst einfach zu gestalten ist.

Die Erfindung ist nicht auf Verfahren und Vorrichtungen unter Verwendung eines unterhalb der schattengebenden Struktur angeordneten Flächenbildsensors beschränkt. In analoger Weise lassen sich für die Bestimmung der Schattenbilder trotz zuvor genannter Nachteile auch andere bildgebende Verfahren, vorzugsweise unter Verwendung von Kameras mit anschließender Bildauswertung, heranziehen.

Alternativ sind auch Verfahren mit und Vorrichtungen als 3D-Positionsmesssystem denkbar, bei dem eine dreidimensionale Struktur der zuvor genannten Art fest auf einem beweglichen Objekt fixiert ist und je nach Einsatzzweck von mindestens drei Kameras mit anschließender Bildauswertung erfasst wird.

Die Erfindung wird im folgenden anhand zweier Ausführungsbeispiele basierend auf je einem mathematischen Modell mit zwei Figuren näher erläutert.

Fig. 1 zeigt das mathematische Modell der ersten Ausführungsform des 3D-Positionsmesssystems mit einer T-förmigen Struktur als Erkennungsmarke.

Fig. 2 zeigt das mathematische Modell der zweiten Ausführungs-

- 5 -

form des 3D-Positionsmesssystems mit einer I-förmigen Struktur als Erkennungsmarke.

Ausführungsform 1 mit T-förmigen Struktur:

Fig. 1 zeigt schematisch die erste Ausführungsform mit drei punktförmigen Lichtquellen 1 bis 3, vorzugsweise Leuchtdioden, welche eine auf dem CCD-Sensorchip 4 orthogonal abstehende T-Struktur 5 als Erkennungsmarke anleuchten und auf der Oberfläche des CCD-Sensorchips Schattenbilder 6 bis 8 erzeugen und durch diesen detektiert werden.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, dass die T-Struktur auch durch andere schattenwerfende Strukturen, welche vorzugsweise mindestens zwei gerade und im rechten Winkel zueinander stehende Balken mit bekannten geometrischen Abmessungen aufweist, insbesondere L-, F- oder H-förmige Strukturen mit ihren Schattenwürfen, als Erkennungsmarken ersetzbar sind.

Der mathematische Algorithmus der ersten Ausführungsform für die Positionsermittlung der eingangs beschriebenen Art stellt sich mit Bezug auf die in Fig. 1 dargestellten Parameter wie folgt dar:

Als Parameter sind folgende Fixpunkte, Abmessungen und Linien des Positionsmesssystems im dreidimensionalen Raum, aufgespannt durch ein sog. Weltkoordinatensystem WKS, d. h. ein kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung O und den Achsen x, y und z definiert:

- L₁ Position der Lichtquelle 1 im Ursprung des Koordinatensystems
- L₂ Position der Lichtquelle 2 auf der x-Achse mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d. h. zu L₁
- L₃ Position der Lichtquelle 3 auf der y-Achse, ebenfalls mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d.h. zu L₁

- 6 -

- O' Position des Fußpunkts des T-Struktur und Ursprung eines Sensorkoordinatensystems SKS, ebenfalls ein kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen x' , y' und z'
- O'H Verbindungslinie der Punkte O' und H, entspricht dem Hauptbalken der T-Struktur mit der Länge h
- MM' Verbindungslinie der Punkte M und M', entspricht dem Querbalken der T-Struktur mit der Länge h
- O'S₁ Verbindungslinie der Punkte O' und S₁ entspricht dem Schattenbild des Hauptbalkens der T-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 1 (L₁) mit der Länge l₁
- N_pN Verbindungslinie der Punkte N_p und N, entspricht dem Schattenbild des Querbalkens der T-Struktur (MM') ausgehend von der Lichtquelle 1 (L₁) mit der Länge l₂
- O'S₂ Verbindungslinie der Punkte O' und S₂ entspricht dem Schattenbild des Hauptbalkens der T-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 2 (L₂) mit der Länge l₃
- LL_p Verbindungslinie der Punkte L_p und L, entspricht dem Schattenbild des Querbalkens der T-Struktur (MM') ausgehend von der Lichtquelle 2 (L₂) mit der Länge l₄
- O'S₃ Verbindungslinie der Punkte O' und S₃ entspricht dem Schattenbild des Hauptbalkens der T-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 3 (L₃) mit der Länge l₅
- PP_p Verbindungslinie der Punkte P_p und P, entspricht dem Schattenbild des Querbalkens der T-Struktur (MM') ausgehend von der Lichtquelle 3 (L₃) mit der Länge l₆

Alle Koordinaten werden zunächst im Sensorkoordinatensystem SKS berechnet, so dass deren Ursprung der Fußpunkt der T-Struktur O' ist: SKS = [o', (x', y', z')]. Der Ursprung O des Weltkoordinatensystems WKS hat dabei folgende Koordinaten:

$$\vec{r}_o = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Durch Anwendung des Strahlensatzes und der Formel zur Bestimmung vom Schnittpunkt zwischen Gerade und Ebene bekommt man folgende sechs Gleichungen für je drei Translations- und drei Rotations-

- 7 -

freiheitsgrade zur Ermittlung der entsprechenden Koordinaten im SKS.

$$\bullet \quad x'_0 = \frac{S_{1x}(h - z'_0)}{h} \quad (1.2)$$

$$\bullet \quad y'_0 = \frac{S_{1y}(h - z'_0)}{h} \quad (1.3)$$

$$\bullet \quad z'_0 = \frac{l_2 h}{l_2 - h} \quad (1.4)$$

$$\bullet \quad \tan \varphi = \frac{S_{2y}(h - z'_0 - q \sin \gamma) - h y'_0}{-S_{2x}(h - z'_0 - q \sin \gamma) + h x'_0} \quad (1.5)$$

$$\bullet \quad \sin \gamma = \frac{z'_0(h - l_4) + h l_4}{q(l_4 - h)} \quad (1.6)$$

$$\bullet \quad \sin \theta = \frac{z'_0(h - l_6) + h l_6}{q(h - l_6) \cos \gamma} \quad (1.7)$$

Es folgt eine Rücktransformation der im SKS ermittelten Koordinaten auf das Koordinatensystem WKS und damit die relative Lage und Ausrichtung des bewegten Objektes:

$$x_0 = -x'_0 \cos \gamma \cos \varphi + y'_0 \cos \gamma \sin \varphi + z'_0 \sin \gamma \quad (1.8)$$

$$y_0 = x'_0 (\sin \theta \sin \gamma \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi) - y'_0 (\sin \theta \sin \gamma \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi) + z'_0 \sin \theta \cos \gamma \quad (1.9)$$

$$z_0 = -x'_0 (\cos \theta \sin \gamma \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi) + y'_0 (\cos \theta \sin \gamma \sin \varphi - \sin \theta \cos \varphi) - z'_0 \cos \theta \cos \gamma \quad (1.10)$$

Dabei sind x_0 , y_0 und z_0 die Koordinaten des Fußpunktes der T-Struktur im WKS und θ der Winkel um die x-Achse, γ der Winkel um die y-Achse und φ der Winkel um die z-Achse.

Um die Position des Sensors zu bestimmen, braucht man nach dem beschriebenen mathematischen Modell die Koordinaten der Extrempunkte des Schattens auf der Oberfläche des CCD-Sensorchips 4. Da H die Spitze des auf dem CCD-Sensorchip orthogonal stehenden

- 8 -

Hauptbalken der T-Struktur 5 im Mittelpunkt des Querbalkens ist und eine zentrale Projektion vorliegt, ist das Bild von H auch der Mittelpunkt des Bildes des Querbalkens. Außerdem ist der Fußpunkt O' auf der Oberfläche des CCD-Sensorchips 4 im SKS invariant.

Die Koordinaten der Extrempunkte des Querbalkens werden aus den gelieferten Sensordaten mit Hilfe der Kantendetektion im Einzelnen, d. h. mit Hilfe von Standardverfahren der digitalen Bildverarbeitung ermittelt.

CCD-Sensorchips sind jedoch mechanisch sehr empfindlich, sodass sich die zuvor genannte T-Struktur auf diesen, wenn überhaupt, nur sehr aufwendig applizieren lässt. Es wird deswegen als Variante der ersten Ausführungsform vorgeschlagen, die T-Struktur durch eine lichtabschwächende oder lichtundurchlässige Folie zu ersetzen, welche mit Abstand h parallel zu dem CCD-Sensorchip aufgespannt wird. In dieser Folie ist ein Spalt, welcher den Querbalken der T-Struktur mit den Endpunkten M und M' substituiert, eingearbeitet, dessen Mitte sich direkt über dem Ursprung O' des definierten SKS, d. h. auf der Achse z' des SKS befindet, positioniert ist. Der Hauptbalken der T-Struktur ist somit als Verbindungslinie entlang der z' -Achse zwischen Ursprung O' und der Mitte des Schlitzes (entsprechend H) nur noch fiktiv vorhanden. Ebenso sind die Schattenwürfe des Hauptbalkens nur noch fiktiv vorhanden, aber genau in der Lage definiert.

Als lichtabschwächende oder lichtundurchlässige Folie eignet sich insbesondere eine dünne Metallfolie, für die Herstellung des Schlitzes in der Folie insbesondere ein mechanisches Bearbeitungs-, ein Laserbearbeitungs- oder ein Ätzverfahren.

In einer weiteren Variante der ersten Ausführungsform wird die zuvor beschriebene lichtundurchlässige oder lichtschwächende Folie durch eine transparente Folie und der Spalt durch einen auf die Folie aufgebracht liegenden und schattenwerfenden Balken oder Strich ersetzt.

Das mathematische Modell und damit der mathematische Algorithmus für die Positionsermittlung ändert sich durch diese Modifikationen der ersten Ausführungsform nicht.

Ausführungsform 1 mit I-förmigen Struktur:

Fig. 2 zeigt das mathematische Modell der zweiten Ausführungsform mit fünf punktförmigen Lichtquellen 9 bis 13, vorzugsweise Leuchtdioden, welche eine auf dem PSD-Sensorchip 14 (PSD = Position Sensitive Device) orthogonal abstehende I-Struktur 15 als Erkennungsmarke anleuchtet und auf der Oberfläche des PSD-Sensorchips Schattenbilder 16 bis 20 erzeugen und durch diesen detektiert werden.

PSD-Sensorchips weisen gegenüber dem CCD-Sensorchip ein wesentlich höheres laterales Auflösungsvermögen auf, eignen sich jedoch nur zur Detektion von Helligkeitsminima und -maxima. Insofern muss bei einer Realisierung der zweiten Ausführungsform die I-Struktur auf jeden Fall durch eine lichtabschwächende oder lichtundurchlässige Folie ersetzt werden, welche mit Abstand h parallel zu dem PSD-Sensorchip aufgespannt wird. In dieser Folie ist eine im Idealfall punktförmige Öffnung eingebracht, welche das abstehende Ende der I-Struktur (Punkt H in Fig. 2) substituiert und direkt über dem Ursprung O' des definierten SKS, d. h. auf der Achse z' des SKS, positioniert ist. Der Balken der I-Struktur ist somit als Verbindungslinie entlang der z' -Achse zwischen Ursprung O' und der punktförmigen Öffnung nur noch fiktiv vorhanden. Ebenso sind die Schattenwürfe der I-Struktur nur noch fiktiv vorhanden, aber genau in der Lage definiert.

Wie bei den beschriebenen Varianten der ersten Ausführungsform eignet sich als lichtabschwächende oder lichtundurchlässige Folie insbesondere eine dünne Metallfolie, für die Herstellung der punktförmigen Öffnung in der Folie insbesondere ein mechanisches Bearbeitungs-, ein Laserbearbeitungs- oder ein Ätzverfahren.

- 10 -

Ebenso lässt sich in Analogie zu der ersten Ausführungsform auch hier die zuvor beschriebene lichtundurchlässige oder lichtschwächende Folie durch eine transparente Folie und die punktförmige Öffnung durch einen auf die Folie aufgebrauchten schattenwerfenden Punkt ersetzen.

Das mathematische Modell gemäß Fig. 2 und damit der nachfolgend beschriebene mathematische Algorithmus für die Positionsermittlung ändern sich hierdurch nicht.

Der mathematische Algorithmus der zweiten Ausführungsform für die Positionsermittlung der eingangs beschriebenen Art stellt sich mit Bezug auf die in Fig. 2 dargestellten Parameter wie folgt dar:

Als Parameter sind mit Bezug auf Fig. 2 folgende Fixpunkte, Abmessungen und Linien des Positionsmesssystems im dreidimensionalen Raum, aufgespannt durch ein sog. Weltkoordinatensystem WKS, d. h. ein kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung O und den Achsen x , y und z definiert:

- L_0 Position der Lichtquelle 9 im Ursprung des Koordinatensystem
- L_1 Position der Lichtquelle 10 auf und in positiver Richtung der x -Achse mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d. h. zu L_0
- L_2 Position der Lichtquelle 11 auf und in negativer Richtung der x -Achse mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d. h. zu L_0
- L_3 Position der Lichtquelle 12 auf und in positiver Richtung der y -Achse ebenfalls mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d. h. zu L_0
- L_4 Position der Lichtquelle 13 auf und in positiver Richtung der y -Achse ebenfalls mit Abstand q zum Ursprung des Koordinatensystems, d. h. zu L_0
- O' Position des Fußpunkts des I-Struktur und Ursprung eines Sensorkoordinatensystems SKS, ebenfalls ein kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen x' , y' und z'

- 11 -

- O'H Verbindungslinie der Punkte O' und H, entspricht dem Balken der I-Struktur mit der Länge h
- O'S₀ Verbindungslinie der Punkte O' und S₀ entspricht dem Schattensbild 16 des Balkens der I-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 9 (L₀) mit der Länge l₀
- O'S₁ Verbindungslinie der Punkte O' und S₁ entspricht dem Schattensbild 17 des Balkens der I-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 10 (L₁) mit der Länge l₁
- O'S₂ Verbindungslinie der Punkte O' und S₂ entspricht dem Schattensbild 18 des Hauptbalkens der I-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 11 (L₂) mit der Länge l₂
- O'S₃ Verbindungslinie der Punkte O' und S₃ entspricht dem Schattensbild 19 des Balkens der I-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 12 (L₃) mit der Länge l₃
- O'S₄ Verbindungslinie der Punkte O' und S₄ entspricht dem Schattensbild 20 des Balkens der I-Struktur (O'H) ausgehend von der Lichtquelle 13 (L₄) mit der Länge l₄

Alle Koordinaten werden zunächst im Sensorkoordinatensystem SKS berechnet, so dass deren Ursprung der Fußpunkt der T-Struktur O' ist: SKS= [o', (x', y', z')]. Der Ursprung O des Weltkoordinatensystems WKS hat dabei folgende Koordinaten:

$$\vec{r}_o = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Um die Position des Sensors zu bestimmen, braucht man neben dem invarianten Punkt O' bei bekannter Länge h nach dem beschriebenen mathematischen Modell gemäß Fig. 2 auch die Koordinaten der Punkte S₀ bis S₄ auf der Oberfläche des PSD-Sensorchips 4. Durch Anwendung des Strahlensatzes und der Formel zur Bestimmung vom Schnittpunkt zwischen Gerade und Ebene bekommt man folgende sechs Gleichungen für je drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgrade zur Ermittlung der entsprechenden Koordinaten im SKS.

- 12 -

$$\bullet \quad \tan \varphi = \frac{(S_{2y} - S_{1y})(2S_{1x}S_{2x} - S_{0x}S_{1x} - S_{0x}S_{2x}) + (S_{1x} + S_{2x} - 2S_{0x})(S_{2x}S_{1y} - S_{2y}S_{1x})}{(S_{1x} - S_{2x})(2S_{1x}S_{2x} - S_{0x}S_{1x} - S_{0x}S_{2x})} \quad (2.2)$$

$$\bullet \quad \tan \gamma = \frac{h(S_{1x} + S_{2x} - 2S_{0x})}{-S_{0x}(S_{1x} + S_{2x}) + 2S_{1x}S_{2x}} \cos \varphi \quad (2.3)$$

$$\bullet \quad \sin \theta = \frac{(S_{3y} + S_{4y} - 2S_{0y})(h - z'_0)}{q(S_{4y} - S_{3y}) \cos \gamma} \quad (2.4)$$

$$\bullet \quad z'_0 = h + \frac{q(S_{1x} \sin \gamma - h \cos \varphi \cos \gamma)}{S_{1x} - S_{0x}} \quad (2.5)$$

$$\bullet \quad x'_0 = \frac{S_{0x}(h - z'_0)}{h} \quad (2.6)$$

$$\bullet \quad y'_0 = \frac{S_{0y}(h - z'_0)}{h} \quad (2.7)$$

Es folgt eine Rücktransformation der im SKS ermittelten Koordinaten auf das Koordinatensystem WKS und damit die relative Lage und Ausrichtung des bewegten Objektes entsprechend der im Rahmen der Ausführungsform 1 beschriebenen Formeln (1.8) bis (1.10).

Bezugszeichenliste:

1 - 3	Lichtquellen
4	CCD-Sensorchip
5	T-Struktur
6 - 8	Schattenbilder
9 - 13	Lichtquellen
14	PSD-Sensorchip
15	I-Struktur
16 - 20	Schattenbilder

Patentansprüche:

1. Optisches Positionsmesssystem für die simultane Erfassung von allen sechs Freiheitsgraden in einem dreidimensionalen Raum, bestehend aus einem Messaufnehmer, einer Erkennungsmarke, einer Beleuchtung sowie einer Steuerungseinheit, dadurch gekennzeichnet, dass
 - a) der Messaufnehmer ein CCD-Sensorchip (4) ist, welcher auf einem bewegten Objekt appliziert ist,
 - b) die Erkennungsmarke eine für die Erzeugung von Schattenbildern geeignete, d. h. lichtundurchlässige oder -abschwächende T-förmige Struktur (5) ist, welche auf der sensitiven Seite des CCD-Sensorchips (4) abstehend fixiert ist,
 - c) die Beleuchtung mindestens drei im Idealfall punktförmige Lichtquellen, vorzugsweise lichtstarke Leuchtdioden sind,
 - d) die Anzahl und Positionierung der Lichtquellen im dreidimensionalen Raum so gewählt ist, dass in jeder zu messenden Position und Ausrichtung des Objekts die Lichtstrahlen von wenigstens drei Lichtquellen, welche nicht in einer Linie angeordnet sind, jeden Punkt des Umrisses der T-förmige Struktur (5) unbehindert erreichen können und in Verlängerung davon auf den CCD-Sensorchip (4) auftreffen, sowie
 - e) die Steuerungseinheit eine Bildverarbeitung mit implementiertem mathematischem Modell und einem dazugehörigen mathematischen Auswertalgorithmus zur Ermittlung der Lage und Position des bewegten Objekts, eine Triggerschaltung für die laufende oder taktweise Ansteuerung der Lichtquellen sowie für die laufende oder taktweise Aufnahme der entsprechenden Schattenbilder auf dem CCD-Sensorchip enthält.

2. Optisches Positionsmesssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die T-förmige Struktur (5) durch andere schattenwerfende Strukturen, welche vorzugsweise mindestens zwei

- 15 -

gerade und im rechten Winkel zueinander stehende Balken mit bekannten geometrischen Abmessungen aufweist ersetzt wird.

3. Optisches Positionsmesssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die T-förmige Struktur durch eine lichtabschwächende oder lichtundurchlässige Folie ersetzt wird, welche parallel zum CCD-Sensorchip mit einem Abstand, der der Höhe der T-förmigen Struktur entspricht, zu diesem fixiert ist und einen lichtdurchlässigen Schlitz aufweist, welcher Querbalken der T-förmigen Struktur substituiert.
4. Optisches Positionsmesssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die lichtundurchlässige oder lichtschwächende Folie durch eine transparente Folie und der Spalt durch einen auf die Folie aufgebrachten liegenden und schattenwerfenden Balken oder Strich ersetzt ist.
5. Optisches Positionsmesssystem für die simultane Erfassung von allen sechs Freiheitsgraden in einem dreidimensionalen Raum, bestehend aus einem Messaufnehmer, einer Erkennungsmarke, einer Beleuchtung sowie einer Steuerungseinheit, dadurch gekennzeichnet, dass
 - a) der Messaufnehmer ein PSD-Sensorchip (14) ist, welcher auf einem bewegten Objekt appliziert ist,
 - b) die Erkennungsmarke eine punktförmige Öffnung ist, welche in einer mit einem bestimmten Abstand parallel vor dem PSD-Sensorchip (14) angeordneten lichtabschwächenden oder lichtundurchlässigen Folie eingebracht ist,
 - c) die Beleuchtung mindestens fünf im Idealfall punktförmige Lichtquellen, vorzugsweise lichtstarke Leuchtdioden sind,
 - d) die Anzahl und Positionierung der Lichtquellen im dreidimensionalen Raum so gewählt ist, dass in jeder zu messenden Position und Ausrichtung des Objekts die Lichtstrahlen von wenigstens fünf Lichtquellen, welche nicht in einer Linie angeordnet sind, durch die punktförmige Öffnung hindurch ungehindert den PSD-Sensorchip erreichen, sowie

- 16 -

- e) die Steuerungseinheit eine Bildverarbeitung mit implementiertem mathematischem Modell und einem dazugehörigen mathematischen Auswertalgorithmus zur Ermittlung der Lage und Position des bewegten Objekts, eine Triggerschaltung für die laufende oder taktweise Ansteuerung der Lichtquellen sowie für die laufende oder taktweise Aufnahme der entsprechenden Schattenbilder auf dem PSD-Sensorchip enthält.
6. Optisches Positionsmesssystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet dass die lichtundurchlässige oder lichtschwächende Folie durch eine transparente Folie und die punktförmige Öffnung durch einen auf die Folie aufgebrauchten schattenwerfenden Punkt ersetzt ist.

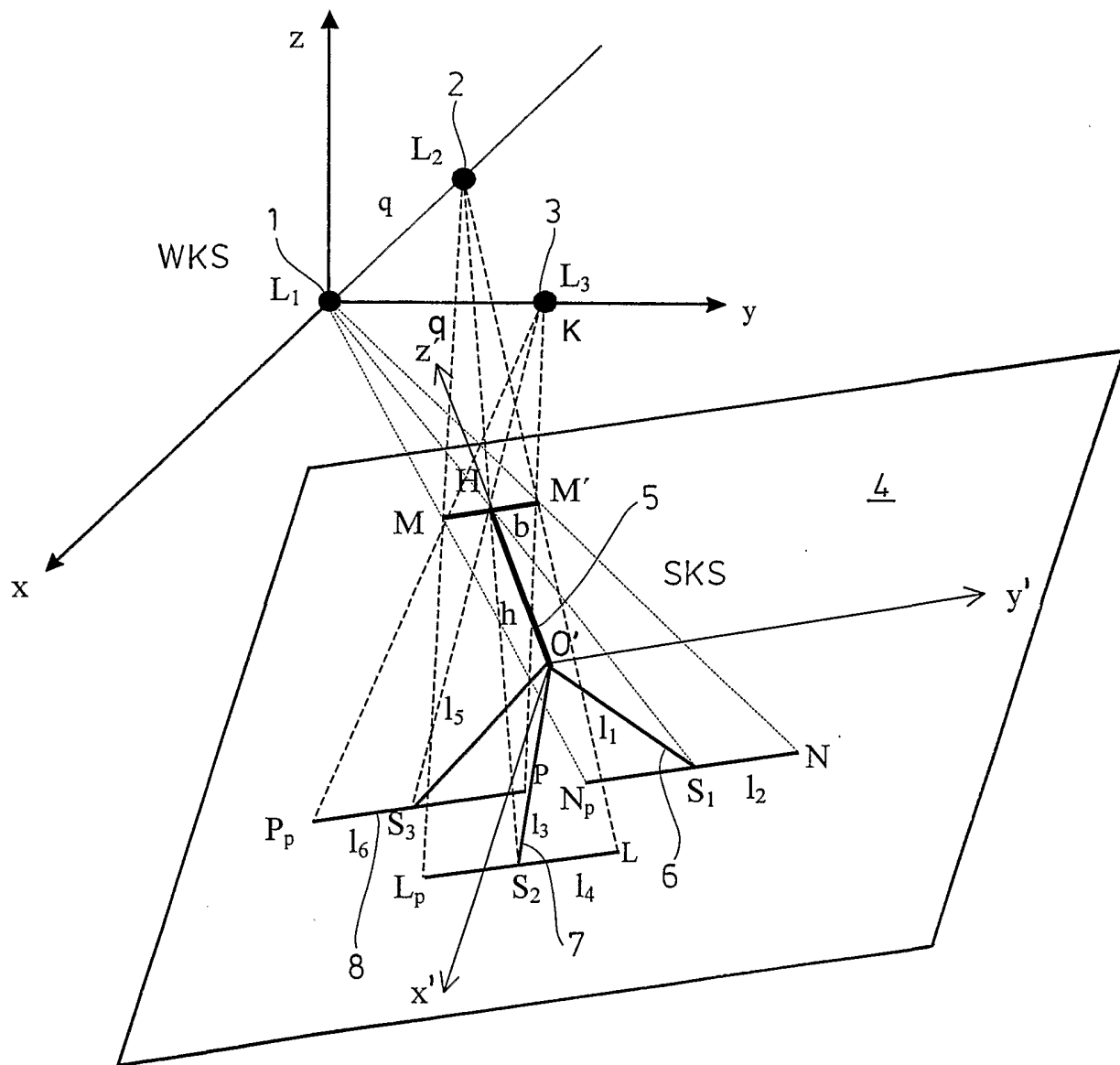


Fig. 1

