



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2023/188433**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2022 004 902.2**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2022/017003**
(86) PCT-Anmeldetag: **01.04.2022**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **05.10.2023**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **14.08.2024**

(51) Int Cl.: **G05B 19/4069** (2006.01)

(71) Anmelder:
Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo, JP
(74) Vertreter:
**Diehl & Partner Patent- und Rechtsanwaltskanzlei
mbB, 80636 München, DE**

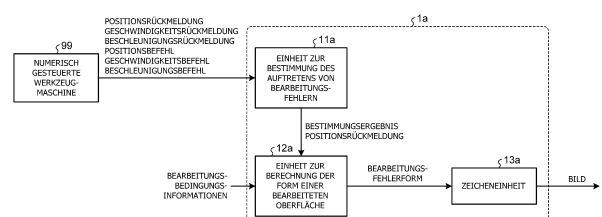
(72) Erfinder:
**Fujita, Tomoya, Tokyo, JP; Uemura, Hiroki, Tokyo,
JP; Matsuno, Junji, Tokyo, JP**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche und Verfahren zur Anzeige der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche**

(57) Zusammenfassung: Eine Vorrichtung (1a) zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche ist eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche, die die Erscheinungsmerkmale einer bearbeiteten Oberfläche eines Werkstücks simuliert, das mit einer Werkzeugmaschine bearbeitet wird, bei der eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm angesteuert wird. Die Vorrichtung (1a) zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst: eine Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, die auf Basis von Achsendaten, die Daten über den Betrieb der Achse sind, bestimmt, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, der vorgegeben ist und das Erscheinungsbild charakterisiert; eine Einheit (12a) zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche, die eine Bearbeitungsfehlerform, die durch einen Bearbeitungsfehler verursacht wird, auf Basis einer Bearbeitungsbedingung, unter der die Werkzeugmaschine das Werkstück bearbeitet, und Achsenposition berechnet; und eine Zeicheneinheit (13a), die die berechnete Bearbeitungsfehlerform darstellt.



Beschreibung

Gebiet

[0001] Die vorliegende Offenbarung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche und ein Verfahren zur Anzeige der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zur Simulation von Erscheinungsmerkmalen einer bearbeiteten Oberfläche eines Werkstücks.

Hintergrund

[0002] Eine Werkzeugmaschine ist eine mechanische Vorrichtung, die eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm antreibt, um ein Produkt mit einer gewünschten Form herzustellen. Bekannte Techniken zur Umsetzung einer hochpräzisen Bearbeitung umfassen ein Verfahren zur Vorhersage des Auftretens von Bearbeitungsfehlern vor der Bearbeitung mit Hilfe einer Simulation und ein Verfahren zur Erfassung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern durch Überwachung von Daten, die von der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung ausgegeben werden.

[0003] Das Patentedokument 1 offenbart eine Simulation einer dreidimensionalen Form, bei der das Volumen eines Bereichs, der durch ein Werkzeug von einem Werkstück entfernt werden soll, in jedem Berechnungsschritt auf Basis der Bahn, die das Werkzeug durchläuft, berechnet und die Form nach der Bearbeitung vorhergesagt wird. Durch die Anwendung der Technik aus Patentedokument 1 ist es möglich, eine genaue Bearbeitungsform vorherzusagen, wenn die Trajektorie (der Bahnverlauf) bekannt ist, die das Werkzeug durchläuft.

Liste der Zitate

Patentliteratur

[0004] Patentedokument 1: Japanische Offenlegungsschrift Nr. 2010-237843

Kurzbeschreibung

Technische Problemstellung

[0005] Die dem oben beschriebenen Patentedokument 1 gemäß herkömmliche Technik erfordert jedoch viele Rechenressourcen, um eine hochgenaue Simulation einer dreidimensionalen Form zu implementieren, was insofern problematisch ist, als es lange dauert, die Form nach der Bearbeitung vorherzusagen. Darüber hinaus kann bei der in Patentedokument 1 beschriebenen Technik zwar die Form nach der Bearbeitung genau vorhergesagt werden, es wird jedoch nicht das Erscheinungsbild simuliert, so dass es nicht möglich ist, eine Änderung des Aus-

sehens der Oberfläche zurückzumelden, wenn beispielsweise ein Fehler von mehreren Mikrometern auftritt.

[0006] Die vorliegende Offenbarung wurde in Anbetracht der obigen Ausführungen erstellt, wobei eine Aufgabe darin besteht, eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zu schaffen, die die Erscheinungsmerkmale der bearbeiteten Oberfläche durch einfache Berechnung vorhersagen kann.

Lösung der Problemstellung

[0007] Um das obige Problem zu lösen und die Aufgabe zu erfüllen, handelt es sich bei einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vorliegenden Offenbarung um eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche, die die Erscheinungsmerkmale einer bearbeiteten Oberfläche eines Werkstücks simuliert, das mit Hilfe einer Werkzeugmaschine bearbeitet wird, die eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm ansteuert. Eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vorliegenden Offenbarung umfasst: eine Einheit zur Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers, die auf Basis von Achsendaten, bei denen es sich um Daten über den Betrieb der Achse handelt, bestimmt, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, der vor eingestellt ist und das Erscheinungsbild charakterisiert; eine Einheit zur Berechnung der Form einer bearbeiteten Oberfläche, die eine Bearbeitungsfehlerform, die durch den Bearbeitungsfehler verursacht wird, auf Basis der Bearbeitungsbedingung, unter der die Werkzeugmaschine das Werkstück bearbeitet, und der Achsenposition berechnet; und eine Zeicheneinheit, die die berechnete Bearbeitungsfehlerform zeichnet.

Vorteilhafte Wirkungen der Erfindung

[0008] Mit Hilfe einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vorliegenden Offenbarung können die Erscheinungsmerkmale der bearbeiteten Oberfläche durch einfache Berechnung vorhergesagt werden.

Kurzbeschreibung der Figuren

Fig. 1 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Konfigurationsbeispiels einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung der Konfiguration der X-Achsen-Antriebseinheit, die eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine gemäß der ersten Ausführungsform aufbaut.

Fig. 3 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für den Mechanismus eines Bearbeitungsfehlers bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 4 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für einen Aspekt eines Bearbeitungsfehlers bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 6 zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 7 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines ersten Beispiels für eine Bearbeitungsbahn bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 8 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für Beschleunigungskurvenverläufe während einer Bearbeitung bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 9 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines ersten Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 10 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für eine Fehlertrajektorie, die von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform gezeichnet wurde.

Fig. 11 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Werkzeug und eine Bearbeitungsfehlerform gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 12 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung der Deformation der mechanischen Struktur, durch die das Werkzeug bei der ersten Ausführungsform angehoben wird.

Fig. 13 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für Beschleunigungskurvenverläufe während einer Präzisionsbearbeitung bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 14 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines zweiten Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 15 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines zweiten Beispiels für eine Bearbeitungsbahn bei der ersten Ausführungsform.

Fig. 16 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines dritten Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 17 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Konfiguration einer Steuerschaltung gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 18 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Konfiguration einer dedizierten Hardwareschaltung gemäß der ersten Ausführungsform.

Fig. 19 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform.

Fig. 20 zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform.

Fig. 21 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 22 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der dritten Ausführungsform.

Fig. 23 zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der dritten Ausführungsform.

Fig. 24 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der dritten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 25 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung der bei der vierten Ausführungsform vorhergesagten Vibration des Werkzeugs.

Fig. 26 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vierten Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 27 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der fünften Ausführungsform.

Fig. 28 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der fünften Ausführungsform erzeugt wurde.

Fig. 29 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der sechsten Ausführungsform.

Fig. 30 zeigt ein Blockschaltbild zur Erläuterung eines Beispiels für die Konfiguration einer Maschinenlernvorrichtung, die in einer Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der sechsten Ausführungsform enthalten ist.

Beschreibung von Ausführungsformen

[0009] Nachfolgend werden eine Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche und ein Verfahren zur Anzeige der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die Figuren ausführlich beschrieben.

Erste Ausführungsform

[0010] **Fig. 1** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Konfigurationsbeispiels einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 gemäß der ersten Ausführungsform. Die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 ist eine Werkzeugmaschine, die eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm antreibt. Bei der ersten Ausführungsform handelt es sich bei der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 um eine Maschine zur spanenden Bearbeitung mit drei orthogonalen Achsen.

[0011] Die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 umfasst eine X-Achsen-Antriebseinheit 93X, die die X-Achse antreibt, eine V-Achsen-Antriebseinheit 93V, die die V-Achse antreibt, eine Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y, die die Y-Achse antreibt, eine Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z, die die Z-Achse antreibt, und eine Spindel 83. Bei der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 handelt es sich um eine Werkzeugmaschine mit Tandem-Antrieb, wobei sie eine so genannte Gantry-Bauweise aufweist. Die X-Achsen-Antriebseinheit 93X und die V-Achsen-Antriebseinheit 93V verfahren die Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y in X-Richtung. Die Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y verfährt die Z-Achsen-

Antriebseinheit 93Z in Y-Richtung. Die Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z verfährt die Spindel 83 in Z-Richtung a. Die Spindel 83 dreht das Werkzeug 76. Ein zu bearbeitendes Werkstück 78 wird auf dem Arbeitstisch 77 angebracht. Die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 bearbeitet das Werkstück 78, indem sie das Werkzeug 76 dreht und dabei die Spindel 83 mit Hilfe der X-Achsen-Antriebseinheit 93X, der V-Achsen-Antriebseinheit 93V, der Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y und der Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z bewegt.

[0012] Die von der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 ausgeführte Bearbeitung besteht darin, jede Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm anzusteuern und die Bearbeitungsform des Werkstücks 78 durch spanende Bearbeitung zu realisieren. Ob die Bearbeitung der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 korrekt ist, wird danach bestimmt, ob die Bearbeitungsform des Werkstücks 78 einen vorgegebenen Standard, konkret die Formgenauigkeit und die Oberflächengenauigkeit, die vorab festgelegt wurden, erreicht.

[0013] Bei der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 wird bei jeder Achse die Drehbewegung eines Motors 71, bei dem es sich um einen Aktor handelt, durch eine Vorschubspindel 73 in eine lineare Bewegung in Antriebsrichtung der jeweiligen Achse umgewandelt. Dabei wird die Drehbewegung durch einen Führungsmechanismus 72 unterstützt, so dass die Achse nur einen Freiheitsgrad in Vorschubrichtung der Vorschubspindel 73 besitzt. Folglich werden bei der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 die linearen Bewegungen der jeweiligen Achsen kombiniert, um eine Bewegung des Werkzeugs 76 im dreidimensionalen XYZ-Raum zu realisieren, d. h. eine Bewegung des Werkzeugs 76 mit drei Freiheitsgraden. Die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 dreht das Werkzeug 76 mit Hilfe der Spindel 83, um das Material des Bereichs des Werkstücks 78 abzutragen, der sich mit dem Werkzeug 76 überschneidet, wodurch die dreidimensionale Bearbeitungsform des Werkstücks 78 entsteht.

[0014] Als Nächstes werden die X-Achsen-Antriebseinheit 93X, die V-Achsen-Antriebseinheit 93V, die Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y und die Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z beschrieben, die die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 aufbauen. Dabei wird die X-Achsen-Antriebseinheit 93X als Beispiel beschrieben, die Beschreibung der X-Achsen-Antriebseinheit 93X gilt jedoch jeweils auch für die V-Achsen-Antriebseinheit 93V, Y-Achsen-Antriebseinheit 93Y und Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z.

[0015] **Fig. 2** zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung der Konfiguration der X-Achsen-

Antriebseinheit 93X, die eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 gemäß der ersten Ausführungsform aufbaut. Wie in **Fig. 2** dargestellt ist, umfasst die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 eine Befehlswertberechnungseinheit 9, eine Servosteuereinheit 6a und eine mechanische Geräteeinheit 96. Die mechanische Geräteeinheit 96 umfasst einen Antriebsmechanismus 97 und eine mechanische Struktur 98. Die Befehlswertberechnungseinheit 9, die Servosteuereinheit 6a und der Antriebsmechanismus 97 bilden die X-Achsen-Antriebseinheit 93X.

[0016] Der Antriebsmechanismus 97 hat die Aufgabe, die Drehbewegung des X-Achsen-Motors 71 in eine lineare Bewegung umzuwandeln und die Anordnung für eine solche Umwandlung zu unterstützen. Bei der X-Achsen-Antriebseinheit 93X wird die Drehbewegung des Motors 71 über eine Kuppelung 74 auf die Vorschubspindel 73 übertragen und über eine Mutter 80 und eine Untersetzung 79 in eine lineare Bewegung umgewandelt. Eine lineare Bewegung der Vorschubspindel 73 wird durch Stützlager 75a und 75b beschränkt. Die lineare Bewegung der Mutter 80 bewegt das Werkzeug 76 in X-Richtung zusammen mit einer Halterung 90, die von der X-Achse gestützt wird. Die Halterung 90 ist ein Oberbegriff für die Z-Achse, die sich zwischen dem Werkzeug 76 und der Mutter 80 befindet, und der Stützordnung. Der Bereich der mechanischen Struktur 98 variiert je nach Achse. Zum Beispiel ist der Z-Achsen-Antriebsmechanismus 97, der nicht die Aufgabe hat, die Bewegung des X-Achsen-Motors 71 von der X-Achse aus betrachtet umzuwandeln, im Umfang der mechanischen Struktur 98 der X-Achse enthalten.

[0017] Ein Positionsbefehl Xc für die X-Achse wird von der Befehlswertberechnungseinheit 9 ausgegeben und in die Servosteuereinheit 6a eingegeben. Der Positionsbefehl Xc gibt eine Position an, die von der Befehlswertberechnungseinheit 9 in Übereinstimmung mit dem Bearbeitungsprogramm berechnet wurde, wobei die Position des anzutreibenden Objekts in einem gewünschten Steuerzustand angegeben wird. Die Servosteuereinheit 6a führt eine Rückkopplungssteuerung durch, um den Fehler zwischen einer erfassten Position Xd und dem Positionsbefehl Xc zu verringern, und gibt einen Motorstrom Ix an den Motor 71 aus, um den Antriebsmechanismus 97 anzutreiben. Die erfasste Position Xd wird erhalten, indem der Drehwinkel des Motors 71, der von einem am Motor 71 angebrachten Drehwinkeldetektor 2 erfasst wird, mit der Gewindesteigung der Vorschubspindel 73 multipliziert wird. Die mechanische Struktur 98, die das zu steuernde Werkzeug 76 aufweist, ist mit dem Antriebsmechanismus 97 verbunden.

[0018] Die Servosteuereinheit 6a führt eine Steuerung durch, um die erfasste Position Xd mit der durch den Positionsbefehl Xc angegebenen Position durch Rückkopplungssteuerung abzugleichen. Jedoch kann selbst bei einer Rückkopplungssteuerung eine Abweichung zwischen der Spitzenposition des Werkzeugs 76 und dem Bearbeitungspunkt des Werkstücks 78 während der Bearbeitung auftreten, und Material des Werkstücks 78 kann ungeschnitten bleiben oder übermäßig geschnitten werden, was zu einem Bearbeitungsfehler führt.

[0019] **Fig. 3** zeigt eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für den Mechanismus eines Bearbeitungsfehlers bei der ersten Ausführungsform. **Fig. 3** veranschaulicht einen Bearbeitungsfehler, der durch eine Verformung der Halterung 90 aufgrund der Bewegung der X-Achsen-Antriebseinheit 93X verursacht wird, die nicht durch eine Rückkopplungssteuerung gehandhabt werden kann.

[0020] Wenn die X-Achsen-Antriebseinheit 93X eine Beschleunigung/Verlangsamung ausführt, wird die Antriebskraft des Motors 71 über die Vorschubspindel 73 auf die Halterung 90 übertragen. Wenn die Steifigkeit der Halterung 90 ungenügend ist, wird die Antriebskraft des Motors 71 auf die Halterung 90 übertragen und die Halterung 90 dadurch verformt. Durch diese Verformung wird das Werkzeug 76 in Z-Richtung verschoben. Der Drehwinkeldetektor 2 der X-Achsen-Antriebseinheit 93X kann einen in X-Richtung auftretenden Fehler der X-Achsen-Antriebseinheit 93X erfassen, nicht aber einen in Z-Richtung auftretenden Fehler. Darüber hinaus kann diese Verformung, die außerhalb der Z-Achsen-Antriebseinheit 93Z auftritt, vom Drehwinkeldetektor 2 der X-Achsen-Antriebseinheit 93X nicht erfasst werden.

[0021] Infolgedessen wird die Verformung der Halterung 90 durch den Drehwinkeldetektor 2 keiner Achse erkannt, und somit funktioniert die Rückkopplungssteuerung bei einer solchen Verformung nicht. Das Werkzeug 76 dringt aufgrund der Verformung der Halterung 90 in das Werkstück 78 ein und es kommt zu einem Bearbeitungsfehler. Da sich das Werkzeug 76 in einer Drehbewegung befindet, schabt das Werkzeug 76 Material in Kreisform von der Oberfläche des Werkstücks 78 ab, wenn es mit dem Werkstück 78 in Kontakt kommt. Ein solcher Bearbeitungsfehler verursacht eine Bearbeitungsfehlerform, bei der es sich um eine kreisförmige Bearbeitungsspur handelt.

[0022] **Fig. 4** zeigt eine Darstellung zur Erläuterung eines Beispiels für einen Aspekt eines Bearbeitungsfehlers bei der ersten Ausführungsform. **Fig. 4** zeigt ein Beispiel für einen Fall, bei dem die oben beschriebene Verformung auftritt, wenn die Bearbeitung mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt wird, wäh-

rend die Achse in X-Richtung bewegt wird, wobei ein zylindrisches Werkzeug 76, ein gerader Schafffräser, verwendet wird. Die Bewegungsrichtung 21 des Werkzeugs 76 ist die X-Richtung. **Fig. 4** zeigt schematisch einen Zustand, bei dem die Form des Bearbeitungsfehlers, der verursacht wird, wenn die X-Achse in der Nähe des Zentrums der X-Richtung verlangsamt wird, aus der Z-Richtung betrachtet wird. Zur Veranschaulichung zeigt **Fig. 4** auch schematisch die Änderung der Lage (oder Stellung) der mechanischen Struktur 98, wenn die Achse in X-Richtung bewegt wird.

[0023] In dem in **Fig. 4** dargestellten Beispiel verlangsamt sich das Werkzeug 76 in der Nähe der Mitte der Strecke, die das Werkzeug 76 in der Bewegungsrichtung 21 zurücklegt. In der Nähe der Mitte wird das Werkzeug 76 aufgrund der Lageänderung der mechanischen Struktur 98 in das Werkstück 78 gesenkt, wodurch mehr Material als nötig von der Oberfläche des Werkstücks 78 abgetragen wird. Daher bleibt auf der Oberfläche des Werkstücks 78 eine kreisförmige Bearbeitungsspur zurück, deren Durchmesser der äußeren Form des Werkzeugs 76 entspricht. Auf diese Weise wird an der bearbeiteten Oberfläche des Werkstücks 78, an dem die Bearbeitung durchgeführt wird, eine Bearbeitungsfehlerform verursacht, die die Erscheinung der bearbeiteten Oberfläche charakterisiert. Die Bearbeitungsfehlerform ist eine Form, die aufgrund eines Bearbeitungsfehlers an der bearbeiteten Oberfläche entsteht. Ein Beispiel für eine Bearbeitungsfehlerform 20, die bei der ersten Ausführungsform gezeigt wird, ist die Form eines Eindrucks, der während der Beschleunigung oder Verlangsamung der Achse durch das Einsenken des Werkzeugs 76 in das Werkstück 78 verursacht wird. Da sich das Werkzeug 76 während der Drehung in X-Richtung vorwärtsbewegt, ist die Bearbeitungsfehlerform 20 kein perfekter Kreis, wobei hier jedoch angenommen wird, dass die Bearbeitungsfehlerform 20 ein Kreis ist.

[0024] Es wird darauf hingewiesen, dass in den **Fig. 3** und **4** die Lageänderung der mechanischen Struktur 98 übertrieben dargestellt ist, um den Mechanismus des Auftretens von Fehlern zu verdeutlichen. Die Größe der Lageänderung, die bei der tatsächlichen Bearbeitung auftritt, beträgt beispielsweise etwa 100 Mikrometer oder weniger bei einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99, die Metall bearbeitet, und etwa einige Mikrometer oder weniger bei einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99, die hochpräzise ist, wobei es schwierig ist, die Lageänderung der mechanischen Struktur 98 im Moment des Auftretens eines Fehlers visuell zu überprüfen. Bei einer bearbeiteten Metalloberfläche verursacht jedoch selbst ein Bearbeitungsfehler von einigen Mikrometern eine Änderung bezüglich der Reflexion und Interferenz des Lichts, so dass der Bearbeitungsfehler als ein Merkmal der

bearbeiteten Oberfläche wahrgenommen wird, das für das menschliche Auge sichtbar ist. Selbst wenn die Maßgenauigkeit innerhalb der vorgesehenen Toleranz liegt, kann daher die Qualität der bearbeiteten Oberfläche mit dem menschlichen Auge als unzureichend beurteilt und als Bearbeitungsfehler betrachtet werden. Die mangelhafte Qualität der bearbeiteten Oberfläche führt zu einer erneuten Bearbeitung und Entsorgung des fehlerhaften Werkstücks 78, was nicht wünschenswert ist. Beispiele für solche Bearbeitungsfehler, die das Erscheinungsbild der bearbeiteten Oberfläche kennzeichnen, sind ein Streifenmuster, das durch Vibration der mechanischen Struktur 98 verursacht wird, und ein Strichmuster, das durch die mit Reibung verbundene Quadrantenprojektion entsteht.

[0025] **Fig. 5** zeigt ein Blockschaltbild, das die Konfiguration einer Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform veranschaulicht. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche führt eine Simulation der Qualität der bearbeiteten Oberfläche durch, wobei die Erscheinungsmerkmale einer bearbeiteten Oberfläche des Werkstücks 78 simuliert werden, das mit einer Werkzeugmaschine bearbeitet wird. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche simuliert eine Bearbeitungsfehlerform, die ein Erscheinungsmerkmal ist, das auf der bearbeiteten Oberfläche aufgrund eines Bearbeitungsfehlers entsteht. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche sagt die Qualität der bearbeiteten Oberfläche vorher, indem sie eine Simulation der Qualität der bearbeiteten Oberfläche durchführt.

[0026] Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst eine Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, die bestimmt, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, eine Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche, die die Bearbeitungsfehlerform berechnet, und eine Zeicheneinheit 13a, die die berechnete Bearbeitungsfehlerform zeichnet.

[0027] Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern empfängt Achsendaten für jede Achse der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99. Die Achsendaten sind Daten über den Betrieb der Achse, wobei es sich um eine Positionsrückmeldung und/oder eine Geschwindigkeitsrückmeldung und/oder eine Beschleunigungsrückmeldung und/oder einen Positionsbefehl und/oder einen Geschwindigkeitsbefehl und/oder einen Beschleunigungsbefehl handelt. Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern bestimmt auf Basis der Achsendaten, ob ein vorgegebener Fehler aufgrund des Betriebs der Achse als

Fehler auftritt. Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern bestimmt das Auftreten oder Nichtauftreten eines jeweiligen Bearbeitungsfehlers, der das Erscheinungsbild der bearbeiteten Oberfläche charakterisiert. Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern gibt die Positionsrückmeldung und das Bestimmungsergebnis an die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche aus.

[0028] Wenn festgestellt wird, dass ein Bearbeitungsfehler auftritt, berechnet die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche die durch den Bearbeitungsfehler verursachte Bearbeitungsfehlerform und die Position, an der die Bearbeitungsfehlerform auftritt, auf Basis der Positionsrückmeldung jeder Achse und der Informationen über die Bearbeitungsbedingungen. Die Bearbeitungsbedingungeninformationen sind Informationen über die Bearbeitungsbedingungen, unter denen die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 das Werkstück 78 bearbeitet.

[0029] Die Zeicheneinheit 13a erzeugt ein Bild, das einen Zustand zeigt, in dem die von der Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnete Bearbeitungsfehlerform an der von der Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechneten Position gebildet wird. Die Zeicheneinheit 13a erzeugt ein Bild, das die Qualität der bearbeiteten Oberfläche simuliert, wenn das Werkstück 78 aus einer bestimmten Blickrichtung betrachtet wird. Die Zeicheneinheit 13a gibt das erzeugte Bild aus.

[0030] Als Nächstes wird die Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch eine Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche beschrieben. **Fig. 6** zeigt ein Flussdiagramm, das eine Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche mit Hilfe einer Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform veranschaulicht.

[0031] In Schritt S1 initialisiert die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Zeitdaten. Hierbei initialisiert die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Zeit t , die für die Berechnung verwendet wird. In Schritt S2 aktualisiert die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche den Berechnungsschritt. Hierbei wird die Zeit durch die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche entsprechend dem Berechnungsschritt um Δt erhöht, um $t = t + \Delta t$ einzustellen. Bei der ersten Ausführungsform ist der Berechnungsschritt ein Zeitintervall, bei dem die Berechnung durchgeführt wird.

[0032] In Schritt S3 bezieht die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche Achsendaten. Im Falle der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 bezieht die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche sechs Zustandsgrößen, bei denen es sich um eine Positionsrückmeldung, eine Geschwindigkeitsrückmeldung, eine Beschleunigungsrückmeldung, einen Positionsbefehl, einen Geschwindigkeitsbefehl und einen Beschleunigungsbefehl handelt, jeweils für die X-Achse, V-Achse, Y-Achse, Z-Achse und Spindel 83.

[0033] In Schritt S4 bestimmt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche, ob ein vorgegebener Bearbeitungsfehler aufgetreten ist. Hierbei bestimmt die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern das Auftreten von Fehlern für jeden vorgegebenen Bearbeitungsfehler, der das Erscheinungsbild der Oberfläche des Werkstücks 78 charakterisiert. Es wird zum Beispiel angenommen, dass ein Fehler in X-Richtung, bei dem es sich um einen Bearbeitungsfehler handelt, der durch Senken des Werkzeugs 76 in die Oberfläche des Werkstücks 78 aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 in X-Richtung verursacht wird, und ein Fehler in Y-Richtung, bei dem es sich um einen Bearbeitungsfehler handelt, der durch Senken des Werkzeugs 76 in die Oberfläche des Werkstücks 78 aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 in Y-Richtung verursacht wird, als Fehler festgelegt werden, die das Erscheinungsbild charakterisieren. In diesem Fall bestimmt die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern jeweils das Auftreten oder Nichtauftreten des Fehlers in X-Richtung und des Fehlers in Y-Richtung. Ein Verfahren zur Bestimmung des Auftretens oder Nichtauftretens von Fehlern wird später beschrieben.

[0034] Als Reaktion auf die Feststellung, dass kein vorgegebener Bearbeitungsfehler aufgetreten ist (Schritt S4, Nein), kehrt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zu Schritt S2 zurück. Wird hingegen festgestellt, dass zumindest einer der vorgegebenen Bearbeitungsfehler aufgetreten ist (Schritt S4, Ja), setzt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Prozedur mit Schritt S5 fort.

[0035] In Schritt S5 berechnet die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche eine Bearbeitungsfehlerform in der Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche. Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnet die Bearbeitungsfehlerform auf Basis der Positionsrückmeldung an der Achse zu dem in Schritt S2 festgelegten Zeitpunkt. Zu diesem Zeitpunkt berechnet die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten

Oberfläche die Bearbeitungsfehlerform unter Verwendung der Informationen über die Bearbeitungsbedingungen. Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnet demnach die Bearbeitungsfehlerform, der durch den Bearbeitungsfehler verursacht wird, auf Basis der Informationen über den Bearbeitungszustand und der Positionsrückmeldung, wobei es sich um Informationen handelt, die die Position der Achse angeben. Ein Verfahren zum Berechnen der Bearbeitungsfehlerform wird später beschrieben. Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche gibt das Ergebnis der Berechnung der Bearbeitungsfehlerform an die Zeicheneinheit 13a aus. Darüber hinaus berechnet die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche die Position der Bearbeitungsfehlerform und gibt die Positionsinformationen als Berechnungsergebnis an die Zeicheneinheit 13a aus.

[0036] In Schritt S6 berechnet die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche Bilddaten, die das Erscheinungsbild der Bearbeitungsfehlerform angeben. Die Zeicheneinheit 13a zeichnet die in Schritt S5 durch Berechnung von Bilddaten berechnete Bearbeitungsfehlerform. Es werden Bilddaten berechnet, die das Erscheinungsbild der bearbeiteten Oberfläche angeben, wenn die bearbeitete Oberfläche unter einem von einer Bedienperson der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gewünschten Winkel betrachtet wird. Der Winkel, der die Blickrichtung angibt, wird vorab durch Eingabe von Parametern oder dergleichen durch die Bedienperson festgelegt. Alternativ dazu bedient die Bedienperson den Bildschirm mit einer Maus oder dergleichen, während sie den Bildschirm betrachtet, wodurch der Winkel, der die Blickrichtung angibt, bestimmt wird.

[0037] In Schritt S7 bestimmt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche, ob die Bearbeitung abgeschlossen ist. Als Reaktion auf die Feststellung, dass die Bearbeitung nicht beendet ist (Schritt S7, Nein), kehrt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zu Schritt S2 zurück. Wird hingegen festgestellt, dass die Bearbeitung abgeschlossen ist (Schritt S7, Ja), beendet die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Durchführung der in **Fig. 6** dargestellten Prozedur.

[0038] Als Nächstes wird ein Verfahren zur Bestimmung des Auftretens oder Nichtauftretens von Fehlern durch die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern beschrieben. **Fig. 7** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines ersten Beispiels für eine Bearbeitungsbahn bei der ersten Ausführungsform. In **Fig. 7** ist die Bearbeitungsbahn durch einen gestrichelten Pfeil dargestellt. **Fig. 7** zeigt ein Beispiel für eine Bearbeitungs-

bahn, entlang der das Werkzeug 76 eine Oberfläche des Werkstücks 78 bearbeitet. Bei dieser Bearbeitung bewegt sich das Werkzeug 76 nicht in Z-Richtung, sondern in der XY-Ebene. Als Werkzeug 76 wird ein gerader Schaftfräser verwendet. Das Werkzeug 76 beginnt seine Bewegung an der Bearbeitungsstartposition P1 an der Außenseite des Werkstücks 78 und bearbeitet die Oberfläche des Werkstücks 78, während es sich in der XY-Ebene des Werkstücks 78 gegen den Uhrzeigersinn entlang einer spiralförmigen Bearbeitungsbahn vom äußeren Umfangsbereich des Werkstücks 78 zur Mitte des Werkstücks 78 bewegt. Das Werkzeug 76 bearbeitet die Oberfläche des Werkstücks 78, bis die Bearbeitungsendposition P2 nahe der Mitte des Werkstücks 78 in der XY-Ebene erreicht ist.

[0039] **Fig. 8** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für Beschleunigungskurvenverläufe während einer Bearbeitung bei der ersten Ausführungsform. **Fig. 8** zeigt den Beschleunigungskurvenverlauf der X-Achse und der Y-Achse, wenn das Werkzeug 76 entlang der in **Fig. 7** dargestellten Bearbeitungsbahn bewegt wird. Die Bewegung in X-Richtung ergibt sich jedoch durch die synchrone Bewegung der X-Achse und der V-Achse, die Tandemachsen sind. Im Allgemeinen führen die Hauptwelle und die Nebenwelle von Tandemachsen im Wesentlichen die gleiche Bewegung aus, und daher wird das Auftreten oder Nichtauftreten von Fehlern auf Basis der Beschleunigung der X-Achse bestimmt. Das Auftreten von Fehlern an der V-Achse kann jedoch unabhängig von der X-Achse bestimmt werden, oder das Auftreten von Bearbeitungsfehlern kann durch Verwendung der V-Achse als Referenz bestimmt werden.

[0040] In **Fig. 8** sind ein Schwellenwert Th1, der ein Kriterium für die Bestimmung eines Fehlers aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 in X-Richtung ist, und ein Schwellenwert Th2, der ein Kriterium für die Bestimmung eines Fehlers aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 in Y-Richtung ist, durch gestrichelte Linien dargestellt. Jeder der Schwellenwerte Th1 und Th2 wird in einem vorab durchgeführten Bearbeitungstest bestimmt. Für den Schwellenwert Th1 wird die Beziehung zwischen der X-Achsen-Beschleunigung und dem Verschiebungsbetrag in Z-Richtung vorab gemessen, wobei ein Beschleunigungswert verwendet werden kann, bei dem in einem Bearbeitungstest ein Bearbeitungsfehler ermittelt wurde. Für die Schwellenwerte Th1 und Th2 kann ein gemeinsamer Wert für jede Werkzeugmaschine verwendet werden, oder es können vorab unterschiedliche Werte für jeweilige Kombinationen von Werkzeug 76 oder Werkstück 78 festgelegt werden. Für die Schwellenwerte Th1 und Th2 können unterschiedliche Werte für jede Art von Bearbeitungsbedingungeninformationen, wie z. B.

die Vorschubstrecke oder die Vorschubgeschwindigkeit pro Schneide, festgelegt werden.

[0041] Wenn die X-Achse in positiver Richtung beschleunigt, gibt es in **Fig. 8** fünf Stellen, an denen ein Fehler festgestellt wird, weil die Beschleunigung den Schwellenwert $Th1$ überschreitet. In Bezug auf die Y-Achse gibt es dagegen keine Stelle, an der ein Fehler festgestellt wird. Dies liegt daran, dass die in **Fig. 1** dargestellte numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 die Eigenschaft hat, dass sie in X-Richtung aufgrund eines Aufbaus, bei dem die Spindel 83 in X-Richtung an einer vorstehenden Position angeordnet ist, leicht verformt wird und in Y-Richtung aufgrund der Abstützung durch zwei Strukturen der X-Achse und der V-Achse aufgrund der Gantry-Struktur kaum verformt wird.

[0042] Es wird darauf hingewiesen, dass der Algorithmus, der in der obigen Beschreibung zur Bestimmung des Auftretens eines Fehlers verwendet wird, ein Beispiel ist und in geeigneter Weise geändert werden kann. Beispielsweise können die Schwellenwerte, die Kriterien für das Auftreten eines Fehlers sind, für die Geschwindigkeitsabweichung, d. h. die Differenz zwischen dem Geschwindigkeitsbefehl und der Geschwindigkeitsrückmeldung, festgelegt werden. Wenn der Wert, der die Position angibt, den für die Position festgelegten Schwellenwert und die Beschleunigung den für die Beschleunigung festgelegten Schwellenwert überschreitet, kann festgestellt werden, dass ein Fehler aufgetreten ist. Alternativ können die Schwellenwerte für ein Ergebnis der Filterung des Beschleunigungswertes festgelegt werden. Die Bestimmungsformel für das Auftreten eines Fehlers kann entsprechend dem Aspekt des Auftretens eines Fehlers in der mechanischen Struktur 98 festgelegt werden.

[0043] **Fig. 9** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines ersten Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche 1a gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wurde. **Fig. 9** veranschaulicht ein Beispiel zum Zeichnen einer Bearbeitungsfehlerform 22 auf der bearbeiteten Oberfläche, bei dem eine Bearbeitungsfehlerform 22, bei der es sich um einen Kreis handelt, der einen Durchmesser aufweist, der dem Durchmesser des Werkzeugs 76 entspricht, an einer Position angeordnet ist, für die ein Fehler in der XY-Ebene bestimmt wurde. Der in diesem Beispiel erzeugte Bearbeitungsfehler ist ein Bearbeitungsfehler, der durch die kreisförmige Bearbeitungsfehlerform 22 gekennzeichnet ist. Ähnlich wie die oben beschriebene Bearbeitungsfehlerform 20 handelt es sich bei der Bearbeitungsfehlerform 22 um die Form eines Eindrucks, der durch Senken des Werkzeugs 76 in das Werkstück 78 während der Beschleunigung oder Verzögerung der Achse verursacht wird.

[0044] Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnet die Bearbeitungsfehlerform 22 mit einem Durchmesser, der dem Durchmesser des Werkzeugs 76 entspricht, um den Bearbeitungsfehler an der Position des Auftretens des Bearbeitungsfehlers in dem Bereich auf dem Werkstück 78 zu simulieren, in dem das Auftreten eines Bearbeitungsfehlers bestimmt wird. Die Bearbeitungsfehlerform 22 beschreibt eine Form, die einen Bearbeitungsfehler im dreidimensionalen Raum simuliert. Die Zeicheneinheit 13a berechnet Bilddaten der Bearbeitungsfehlerform 22 unter einem frei wählbaren Blickwinkel und zeichnet damit ein Bild der Bearbeitungsfehlerform 22 unter dem frei wählbaren Blickwinkel. Die Zeicheneinheit 13a gibt das gezeichnete Bild aus. In dem in **Fig. 9** dargestellten Beispiel ist das von der Zeicheneinheit 13a gezeichnete Bild ein Bild der XY-Ebene, d. h. ein zweidimensionales Bild. Das in **Fig. 9** dargestellte zweidimensionale Bild ist ein Bild des Werkstücks 78, das aus der positiven Z-Richtung betrachtet wird. Bei der Erzeugung eines Bildes des Werkstücks 78, das aus einer Richtung schräg zur Z-Richtung betrachtet wird, zum Beispiel aus einer Richtung von 45 Grad in Bezug auf die Z-Richtung, führt die Zeicheneinheit 13a eine dreidimensionale Koordinatentransformation und dergleichen durch, um ein zweidimensionales Bild zu erzeugen.

[0045] In dem in **Fig. 9** dargestellten Beispiel weist die Bearbeitungsfehlerform 22 eine einfache Kreisform auf, um die Berechnungszeit der Bearbeitungsfehlerform 22 zu verkürzen. Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche kann als Bearbeitungsfehlerform eine Fehlertrajektorie berechnen, bei der es sich um die Trajektorie des für die Bearbeitung verwendeten Werkzeugs handelt und auf welcher der Bearbeitungsfehler auftritt. In diesem Fall zeichnet die Zeicheneinheit 13a eine Fehlertrajektorie entlang der durch den Bearbeitungsfehler tatsächlich gebildeten Form.

[0046] **Fig. 10** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für eine Fehlertrajektorie, die von einer Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform gezeichnet wurde. Die in **Fig. 10** dargestellte Trajektorie 24 ist ein Beispiel für eine Fehlertrajektorie, die von der Schneidkante eines Einschneiden-Schafffräasers gezogen wird, wobei es sich um der Trajektorie der Schnittkante handelt, auf der sich der Fräser in X-Richtung bewegt, die die Bewegungsrichtung 21 ist, während sich die Spindel 83 beim Bearbeiten des Werkstücks 78 dreimal in Drehrichtung 23 dreht. In diesem Fall wird die von der Schneidkante gezogene Trajektorie 24 als Formel (1) unten formuliert.

Formel 1:

$$\left. \begin{aligned} x &= v_x t + R \sin(\omega t + \delta) \\ y &= R \cos(\omega t + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

[0047] Dabei ist v_x die Verfahrensgeschwindigkeit in X-Richtung, R der Radius des Werkzeugs 76, ω die Winkelgeschwindigkeit der Spindel 83 und δ die Phasendifferenz der Schnittkantenposition in Bezug auf den Drehwinkel der Spindel 83. Bei einem Zweischnneiden-Schaftfräser kann die Fehlertrajektorie durch Überlagern von zwei Trajektorien mit um 180 Grad unterschiedlichen Phasen gezogen werden. Auf diese Weise kann die Zeicheneinheit 13a die Bewegungsbahn der Schnittkante näher am tatsächlichen Verhalten berechnen und die Fehlertrajektorie zeichnen. Infolgedessen kann die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche ein genaueres Erscheinungsbild der Bearbeitungsfehlerform simulieren.

[0048] Bei der Fertigbearbeitung, bei der die Qualität der bearbeiteten Oberfläche im Vordergrund steht, wird v_x im Allgemeinen kleiner gewählt als bei der Grobbearbeitung. Daher kann bei der Fertigbearbeitung die Form der Schneidkante zum Zeitpunkt des Auftretens eines Fehlers durch einen Kreis angenähert werden. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche kann die Form der bearbeiteten Oberfläche in kurzer Zeit berechnen, indem sie die tatsächliche Bewegungsbahn durch eine Kreisbewegung approximiert.

[0049] Da die Bearbeitungsfehlerform 22, die das Aussehen der Oberfläche des Werkstücks 78 charakterisiert, je nach Werkzeug 76 unterschiedlich ist, ist es außerdem notwendig, für jedes Werkzeug 76 eine geeignete Bearbeitungsfehlerform 22 zu berechnen, die das Aussehen charakterisiert. **Fig. 11** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Werkzeug 76 und eine Bearbeitungsfehlerform 22 gemäß der ersten Ausführungsform. Ein Radiuschaftfräser (engl. radius end mill) 25 und ein Kugelschaftfräser (engl. ball end mill) 26 sind Beispiele für das Werkzeug 76. **Fig. 11** zeigt einen Radiuschaftfräser 25 in Seitenansicht, die Bearbeitungsfehlerform 22 für den Radiuschaftfräser 25, den Kugelschaftfräser 26 in Seitenansicht und die Bearbeitungsfehlerform 22 für den Kugelschaftfräser 26. In **Fig. 11** ist ein schaftseitiger Abschnitt des Radiuschaftfräasers 25 relativ zur Schneidkante durch eine gestrichelte Linie zusammen mit der Bearbeitungsfehlerform 22 für den Radiuschaftfräser 25 dargestellt. Zusätzlich zur Bearbeitungsfehlerform 22 für den Kugelschaftfräser 26 ist ein schaftseitiger Abschnitt des Kugelschaftfräasers 26 relativ zur Schneidkante durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet. Jede der beiden in **Fig. 11** dargestellten Bearbeitungsfehlerformen 22 ist ein Beispiel für eine Bearbeitungsfehlerform 22,

die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wird.

[0050] Der Radiuschaftfräser 25 weist eine abgerundete Spitze auf. Die Bearbeitungsfehlerform 22 für den Radiuschaftfräser 25 ist ein Kreis, der kleiner ist als die Außenform des Radiuschaftfräasers 25. Bezüglich des Kugelschaftfräasers 26 ist die Bearbeitungsfehlerform 22 ein Punkt, da ein Punkt der Spitze des Kugelschaftfräasers 26 mit dem Werkstück 78 in Kontakt kommt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Bearbeitungsfehlerform 22 auf Basis des Abstands zur Schnittkantenposition des Werkzeugs 76 ermittelt werden kann. Die Bearbeitungsfehlerform 22 kann durch Messen des Durchmessers der tatsächlich übertragenen Form in einem Bearbeitungsversuch oder dergleichen ermittelt werden.

[0051] Als Nächstes wird ein Beispiel für die Vorhersage der Qualität der bearbeiteten Oberfläche im Falle einer anderen Bearbeitung als der oben beschriebenen erläutert. Es wird nun ein Beispiel für die Durchführung einer Präzisionsbearbeitung beschrieben. Bei der Durchführung einer Präzisionsbearbeitung können Bearbeitungsfehler, die die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigen, nicht nur durch das oben beschriebene Senken des Werkzeugs 76 in das Werkstück 78, sondern auch durch Nichtschneiden aufgrund des Abhebens des Werkzeugs 76 vom Werkstück 78 auftreten.

[0052] **Fig. 12** zeigt eine Darstellung zur Erläuterung einer Verformung der mechanischen Struktur 98, durch die das Werkzeug 76 bei der ersten Ausführungsform angehoben wird. **Fig. 12** veranschaulicht schematisch einen Zustand, bei dem die Halterung 90 durch das Verfahren der X-Achsen-Antriebseinheit 93X verformt wird und das Werkzeug 76 von der Oberfläche des Werkstücks 78 abgehoben wird. In einem solchen Zustand wird das Werkzeug 76 von dem Werkstück 78 abgehoben, so dass ein Teil des Werkstücks 78 unbearbeitet bleibt. In diesem Fall wird ein Schwellenwert für die Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers in Bezug auf den Absolutwert der Beschleunigung der Achse festgelegt.

[0053] **Fig. 13** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für Beschleunigungskurvenverläufe während einer Präzisionsbearbeitung bei der ersten Ausführungsform. **Fig. 13** zeigt ein Beispiel für den Beschleunigungskurvenverlauf der X-Achse und der Y-Achse, wenn die Präzisionsbearbeitung auf der gleichen Bearbeitungsbahn wie der in **Fig. 7** dargestellten Bearbeitungsbahn durchgeführt wird. **Fig. 13** zeigt Beschleunigungskurvenverläufe, die den Absolutwert der Beschleunigungsrückmeldung der Achse angeben. Die gestrichelten Linien in **Fig. 13** stellen Schwellenwerte für das Auftreten von Fehlern dar. Die Schwellenwerte können

jedoch auch durch Absolutwerte angegeben werden. Als Schwellenwerte für jede Achse können ein Schwellenwert für eine in positiver Richtung auftretende Beschleunigung und ein Schwellenwert für eine in negativer Richtung auftretende Beschleunigung individuell festgelegt werden. Die Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers kann in jedem Berechnungsschritt erfolgen oder nur für die Achse, an der eine Beschleunigung aufgetreten ist. Die Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers kann innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne ab dem Zeitpunkt des Auftretens der Beschleunigung erfolgen.

[0054] In dem in **Fig. 13** dargestellten Beispiel übersteigt der Absolutwert der Beschleunigungsrückmeldung sowohl für die X-Achse als auch die Y-Achse den Schwellenwert zu jedem Zeitpunkt, an dem eine Beschleunigung/Verzögerung erfolgt. Das heißt, dass sowohl bei der X-Achse als auch bei der Y-Achse zu allen Zeitpunkten, an denen eine Beschleunigung/Verzögerung erfolgt, Bearbeitungsfehler auftreten. **Fig. 14** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines zweiten Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wurde. **Fig. 14** zeigt ein Beispiel für ein Bild, das gezeichnet wird, wenn wie in **Fig. 13** dargestellt ein Bearbeitungsfehler sowohl an der X-Achse als auch an der Y-Achse auftritt.

[0055] Die Bearbeitungsfehlerform 22 wird jeweils zum Zeitpunkt der Beschleunigung/Verzögerung der X-Achse und zum Zeitpunkt der Beschleunigung/Verzögerung der Y-Achse berechnet, wodurch eine doppelt bogenförmige Bearbeitungsfehlerform 22 berechnet wird, wie in **Fig. 14** dargestellt ist. Die Kreisform 27, die in **Fig. 14** durch eine gestrichelte Linie gezeigt ist, gibt an, dass der Absolutwert der Beschleunigungsrückmeldung den Schwellenwert unmittelbar nach Beginn der Bearbeitung überschreitet. Da der durch die Kreisform 27 dargestellte Bearbeitungsfehler jedoch außerhalb des Werkstücks 78 liegt, berechnet die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche die Kreisform 27 nicht als Bearbeitungsfehlerform 22. Die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche bestimmt auf Basis von Informationen über die Montageposition des Werkstücks 78, die in den Bearbeitungsbedingungeninformatoren enthalten sind, dass sich die Kreisform 27 außerhalb des Werkstücks 78 befindet.

[0056] Als Nächstes wird ein Beispiel für die Vorhersage der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche für den Fall beschrieben, dass das Werkstück 78 unter Verwendung einer anderen Bearbeitungsbahn als der oben beschriebenen bearbeitet wird. **Fig. 15** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines

zweiten Beispiels für eine Bearbeitungsbahn bei der ersten Ausführungsform. In **Fig. 15** ist die Bearbeitungsbahn durch einen gestrichelten Pfeil dargestellt. Die Bewegung des Werkzeugs 76 in der XY-Ebene ist bei der in **Fig. 15** dargestellten Bearbeitungsbahn die gleiche wie bei der in **Fig. 7** dargestellten Bearbeitungsbahn. Die in **Fig. 15** dargestellte Bearbeitungsbahn unterscheidet sich von der in **Fig. 7** dargestellten Bearbeitungsbahn dadurch, dass die Bearbeitungsendposition P2 in Z-Richtung von dem Werkstück 78 beabstandet ist. Die Bearbeitungsendposition P2 ist z. B. der Nullpunkt der Maschine. Bei der in **Fig. 15** dargestellten Bearbeitungsbahn fährt die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 das Werkzeug 76 zum Nullpunkt zurück, indem sie das Werkzeug 76 in Z-Richtung aus der Nähe der Mitte der XY-Ebene des Werkstücks 78 hochzieht.

[0057] **Fig. 16** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines dritten Beispiels für ein Bild, das von der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform erzeugt wird. **Fig. 16** zeigt ein Beispiel für ein Bild, das gezeichnet wird, wenn das Werkstück 78 entlang der in **Fig. 15** dargestellten Bearbeitungsbahn bearbeitet wird. Die Kreisform 27, die in **Fig. 16** durch eine gestrichelte Linie dargestellt ist, zeigt an, dass der Absolutwert der Beschleunigungsrückmeldung den Schwellenwert überschreitet, nachdem das Werkzeug 76 in Z-Richtung vom Werkstück 78 hochgezogen wurde. Da der durch die Kreisform 27 dargestellte Bearbeitungsfehler jedoch nach der Trennung des Werkzeugs 76 von der Oberfläche des Werkstücks 78 auftritt, berechnet die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche die Kreisform 27 nicht als Bearbeitungsfehlerform 22.

[0058] Gemäß der ersten Ausführungsform bestimmt die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche auf Basis der Achsendaten, ob ein Bearbeitungsfehler, der vorgegeben ist und das Erscheinungsbild charakterisiert, auftritt, und berechnet auf Basis der Informationen über die Bearbeitungsbedingungen und die Position der Achse die Bearbeitungsfehlerform 22, die durch den Bearbeitungsfehler verursacht wird. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zeichnet die Bearbeitungsfehlerform 22, die bei der Betrachtung der bearbeiteten Oberfläche erkannt werden kann. Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche kann verglichen mit dem Fall, in dem eine sehr genaue Simulation der dreidimensionalen Form erforderlich ist, durch einfache Berechnung ein Bild erzeugen, das das Ergebnis der Vorhersage der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zeigt. Demnach kann die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche das Erschei-

nungsbild der bearbeiteten Oberfläche durch einfache Berechnung vorhersagen.

[0059] Als Nächstes wird die Hardware zur Implementierung der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten Ausführungsform beschrieben. Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche und die Zeicheneinheit 13a werden durch eine Verarbeitungsschaltung implementiert. Die Verarbeitungsschaltung kann eine Schaltung sein, in der ein Prozessor Software ausführt, oder eine dedizierte Schaltung.

[0060] Wenn die Verarbeitungsschaltung durch Software implementiert wird, ist die Verarbeitungsschaltung beispielsweise der in **Fig. 17** dargestellte Steuerschaltkreis. **Fig. 17** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Konfiguration einer Steuerschaltung 200 gemäß der ersten Ausführungsform. Die Steuerschaltung 200 umfasst eine Eingabeeinheit 201, einen Prozessor 202, einen Speicher 203 und eine Ausgabeeinheit 204. Die Eingabeeinheit 201 ist eine Schnittstellenschaltung, die von außerhalb der Steuerschaltung 200 eingegebene Daten empfängt und Daten an den Prozessor 202 liefert. Die Ausgabeeinheit 204 ist eine Schnittstellenschaltung, die Daten von dem Prozessor 202 oder dem Speicher 203 nach außerhalb der Steuerschaltung 200 überträgt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Eingabeeinheit 201 zur Eingabe von Informationen in die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche eine Eingabevorrichtung für die Bedienperson umfassen kann. Die Ausgabeeinheit 204 kann eine Anzeigevorrichtung zur Darstellung des von der Zeicheneinheit 13a erstellten Bildes umfassen.

[0061] Wenn die Verarbeitungsschaltung die in **Fig. 17** dargestellte Steuerschaltung 200 ist, werden die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, die Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche und die Zeicheneinheit 13a durch Software, Firmware oder eine Kombination aus Software und Firmware implementiert. Die Software oder Firmware wird als Programm geschrieben und in dem Speicher 203 gespeichert. In der Verarbeitungsschaltung liest der Prozessor 202 das in dem Speicher 203 gespeicherte Programm und führt es aus, wodurch die jeweilige Funktion implementiert wird. Die Verarbeitungsschaltung umfasst demnach den Speicher 203 zum Speichern eines Programms, das zur Ausführung der Verarbeitung der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche führt. Man kann auch sagen, dass diese Programme einen Computer veranlassen, die Prozeduren und Verfahren der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche auszuführen.

[0062] Bei dem Prozessor 202 handelt es sich um eine Zentraleinheit (CPU, auch als Zentraleinheit, Verarbeitungseinheit, Recheneinheit, Mikroprozessor, Mikrocomputer, Prozessor oder digitaler Signalprozessor (DSP) bezeichnet). Beispiele für den Speicher 203 umfassen einen nichtflüchtigen oder flüchtigen Halbleiterspeicher, eine Magnetplatte, eine Floppy Disk, eine optische Platte, eine Compact-Disk, eine Mini-Disk, eine Digital Versatile Disk (DVD) und dergleichen. Beispiele für nichtflüchtige oder flüchtige Halbleiterspeicher umfassen einen Direktzugriffsspeicher (RAM), einen Festwertspeicher (ROM), einen Flash-Speicher, einen löschbaren programmierbaren Festwertspeicher (EPROM), einen elektrisch löschbaren programmierbaren Festwertspeicher (EEPROM, eingetragene Marke) und dergleichen.

[0063] **Fig. 17** ist ein Beispiel für die Hardware zur Implementierung jeder der Komponenten mit dem Mehrzweck-Prozessor 202 und dem Speicher 203, aber jede der Komponenten kann auch durch eine dedizierte Hardwareschaltung implementiert werden. **Fig. 18** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Konfiguration einer dedizierten Hardwareschaltung 205 gemäß der ersten Ausführungsform.

[0064] Die dedizierte Hardwareschaltung 205 umfasst eine Eingabeeinheit 201, eine Ausgabeeinheit 204 und eine Verarbeitungsschaltung 206. Die Verarbeitungsschaltung 206 ist eine einzelne Schaltung, eine zusammengesetzte Schaltung, ein programmierter Prozessor, ein parallel programmierter Prozessor, eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC), ein Field Programmable Gate Array (FPGA) oder eine Schaltung, bei der es sich um eine Kombination dieser handelt. Die Funktionen der Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche können von der Verarbeitungsschaltung 206 einzeln oder gemeinsam implementiert werden. Jede Komponente kann durch Kombination der Steuerschaltung 200 und der Hardwareschaltung 205 implementiert werden.

[0065] Die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche kann über ein Netzkabel mit der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 verbunden sein oder über ein drahtloses Netzwerk mit der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 verbunden sein. Alternativ kann die Vorrichtung 1a zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche auf einem Server oder in einer Cloud installiert sein, der bzw. die räumlich von der mit dem Netzwerk verbundenen numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 getrennt ist.

Zweite Ausführungsform

[0066] Fig. 19 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform. Bei der zweiten Ausführungsform sind die Komponenten, die mit denen der ersten Ausführungsform identisch sind, mit denselben Bezugszeichen versehen, wobei hauptsächlich die Unterschiede der Konfiguration in Bezug auf die erste Ausführungsform beschrieben werden. Die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst eine Einheit 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche, die sich von der Einheit 12a zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche der ersten Ausführungsform unterscheidet.

[0067] Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern gibt das Ergebnis der Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers und die Achsenpositionsinformationen an die Einheit 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche aus. Die Einheit 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnet auf Basis der Achsenpositionsinformationen eine Hüllkurve für einen Bereich, bei dem festgestellt wurde, dass kein Bearbeitungsfehler vorliegt. Die Hüllkurve stellt eine Trajektorie dar, entlang der die äußere Form des für die Bearbeitung verwendeten Werkzeugs 76 verläuft. Die Zeicheneinheit 13a zeichnet die berechnete Bearbeitungsfehlerform und die berechnete Hüllkurve.

[0068] Fig. 20 zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform. Die in Fig. 20 dargestellte Prozedur der Schritte S1 bis S4 ist ähnlich wie die der in Fig. 6 dargestellten ersten Ausführungsform.

[0069] Als Reaktion auf die Bestimmung, dass ein Bearbeitungsfehler aufgetreten ist (Schritt S4, Ja), berechnet die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Bearbeitungsfehlerform in Schritt S5 wie bei der ersten Ausführungsform. Wenn andererseits festgestellt wird, dass kein Bearbeitungsfehler auftritt (Schritt S4, Nein), setzt die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Prozedur mit Schritt S8 fort.

[0070] In Schritt S8 berechnet die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche in der Einheit 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine Hüllkurve. Bei der Hüllkurve handelt es sich um eine lineare Form, die durch

das Entlangführen der Schnittkante des Werkzeugs 76 während der Bearbeitung hervorgerufen wird, und eine Bearbeitungsfehlerform, die einen Bearbeitungsfehler simuliert, der die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt. Eine Bearbeitungsfehlerform, die eine Hüllkurve ist, wird durch einen geringfügigen Höhenunterschied zwischen benachbarten Bearbeitungsbahnen verursacht. Eine Bearbeitungsfehlerform, die eine Hüllkurve ist, kann aufgrund der Reflexion und Interferenz des Lichts an einem solchen Höhenunterschied visuell als Bearbeitungsfehler erkannt werden. Demnach berechnet die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche bei der zweiten Ausführungsform die Bearbeitungsfehlerform, die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wird, wie bei der ersten Ausführungsform, und zudem die Hüllkurve in dem Bereich, in dem der Bearbeitungsfehler aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 nicht auftritt. Nach Abschluss der Prozedur von Schritt S8 setzt die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Prozedur mit Schritt S6 fort.

[0071] Die Prozedur der Schritte S5 bis S7 ist ähnlich wie bei der in Fig. 6 dargestellten ersten Ausführungsform. Die Zeicheneinheit 13a erzeugt ein Bild, das die Bearbeitungsfehlerform, die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wird, und die Hüllkurve umfasst.

[0072] Fig. 21 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der zweiten Ausführungsform erzeugt wurde. Fig. 21 zeigt ein Beispiel, in dem die Hüllkurve 30 zusammen mit der kreisförmigen Bearbeitungsfehlerform 22 dargestellt ist. Die Hüllkurve 30 ist ein Beispiel für eine Hüllkurve, die mit der Bewegung des Werkzeugs 76 wie in dem in Fig. 7 dargestellten Fall verknüpft ist.

[0073] Gemäß der zweiten Ausführungsform erzeugt die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche ein Bild, das die Bearbeitungsfehlerform, die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wird, und die Hüllkurve umfasst, indem die Hüllkurve berechnet wird. Die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche kann einen Bearbeitungsfehler aufgrund eines geringfügigen Höhenunterschieds zwischen benachbarten Bearbeitungsbahnen als eines der Elemente der Qualität der bearbeiteten Oberfläche simulieren.

Dritte Ausführungsform

[0074] Fig. 22 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Ober-

fläche gemäß der dritten Ausführungsform. Bei der dritten Ausführungsform sind Komponenten, die mit denen der ersten oder zweiten Ausführungsform identisch sind, mit denselben Bezugszeichen versehen, wobei hauptsächlich Konfigurationsunterschiede zur ersten oder zweiten Ausführungsform beschrieben werden. Die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst eine Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche, die sich von den Einheiten 12a und 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche der ersten oder zweiten Ausführungsform unterscheidet.

[0075] Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern gibt das Ergebnis der Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers und die Achsenpositionsinformationen an die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche aus. Die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnet auf Basis der Achsenpositionsinformationen eine Hüllkurve für einen Bereich, bei dem festgestellt wurde, dass kein Bearbeitungsfehler vorliegt. Die Zeicheneinheit 13a stellt die berechnete Bearbeitungsfehlerform und die berechnete Hüllkurve dar.

[0076] Bei der zweiten Ausführungsform zeichnet die Vorrichtung 1b zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Hüllkurve aller Bahnen, entlang derer die Schnittkante des Werkzeugs 76 verläuft. Abhängig von den Bearbeitungsbedingungen kann jedoch der Abstand zwischen einander benachbarten Bereichen der Bearbeitungsbahn kürzer sein als der Abstand zwischen den Schnittkanten des Werkzeugs 76. In diesem Fall kann es vorkommen, dass die Hüllkurve eines der benachbarten Bereiche, der zuerst bearbeitet werden soll, durch die Bearbeitung des anderen Bereichs verschwindet. Umgekehrt gibt es den Fall, dass ein zuerst zu bearbeitender Bereich so tief geschnitten wird, dass das Werkzeug 76 nicht mit dem Werkstück 78 in Berührung kommt, wenn das Werkzeug 76 durch den anderen Bereich fährt. In diesem Fall kann in dem anderen Bereich keine Hüllkurve entstehen. Bei der dritten Ausführungsform löscht daher die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine der benachbarten Hüllkurven, bei denen es sich um die einander benachbarten Hüllkurven handelt, aus einem Bereich, der die berechneten benachbarten Hüllkurven umfasst.

[0077] Fig. 23 zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Prozedur zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche durch die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der dritten Ausführungsform. Die in Fig. 23 dargestellte Prozedur umfasst zusätzlich zu den Schritten S1 bis S8, die denen von Fig. 20 ähnlich sind, den Schritt S9. In

Schritt S9 löscht die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine der benachbarten Hüllkurven aus dem Bereich, der die berechneten benachbarten Hüllkurven umfasst.

[0078] Die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche bezieht die Reihenfolge, in der das Werkzeug 76 jede Position auf der Bearbeitungsbahn durchläuft, aus den Bearbeitungsbahninformationen. Die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche erkennt von den Bereichen, die auf der Bearbeitungsbahn aneinander angrenzen, den Bereich, den das Werkzeug 76 zuerst durchläuft, und den Bereich, den das Werkzeug 76 später durchläuft. Welche der benachbarten Hüllkurven gelöscht werden soll, wird vorab anhand der Bearbeitungsbedingungen festgelegt. Da die Art und Weise, in der Hüllkurven stehen gelassen werden, von der Neigung des angebrachten Werkzeugs 76 abhängen kann, kann die Einstellung für das Löschen benachbarter Hüllkurven geändert werden, wenn das Werkzeug 76 ausgetauscht wird. Nach Abschluss der Prozedur von Schritt S9 fährt die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche mit Schritt S6 fort.

[0079] Die Prozedur der Schritte S5 bis S7 ist ähnlich wie bei der in Fig. 6 dargestellten ersten Ausführungsform. Die Zeicheneinheit 13a erzeugt ein Bild, das die Bearbeitungsfehlerform, die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wird, und die Hüllkurve umfasst.

[0080] Es wird darauf hingewiesen, dass die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche die Prozedur des Löschens der berechneten Bearbeitungsfehlerform nicht nur auf Hüllkurven, sondern auch auf andere Bearbeitungsfehlerformen als Hüllkurven anwenden kann. Beispielsweise kann die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine Bearbeitungsfehlerform aus einem Bereich löschen, in dem sich die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursachten Bearbeitungsfehlerformen gegenseitig überlappen. Alternativ kann die Einheit 12c zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine Bearbeitungsfehlerform, die durch eine Verformung der mechanischen Struktur 98 verursacht wurde, oder eine Hüllkurve aus einem Bereich löschen, in dem sich die Bearbeitungsfehlerform und die Hüllkurve überschneiden.

[0081] Fig. 24 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der dritten Ausführungsform erzeugt wurde. Fig. 24 zeigt ein Beispiel, in dem die Hüllkurve 30 zusammen mit der kreisförmigen Bearbeitungsfehlerform 22 dargestellt ist. Die Hüllkurve 30 ist ein Beispiel für eine Hüll-

kurve, wenn das Werkzeug 76 ähnlich wie in **Fig. 7** dargestellt bewegt wird.

[0082] Das in **Fig. 24** dargestellte Bild unterscheidet sich von dem in **Fig. 21** dargestellten Fall dadurch, dass eine der überlappenden Hüllkurven gelöscht wurde und eine der Hüllkurven und die Bearbeitungsfehlerform 22, die sich gegenseitig überlappen, gelöscht wurden. In dem in **Fig. 24** dargestellten Bild wurde demnach eine der sich überlappenden Hüllkurven gelöscht, entlang der das Werkzeug 76 zuerst bewegt wird. Außerdem wurde in dem in **Fig. 24** dargestellten Bild von der Hüllkurve und der Bearbeitungsfehlerform 22, die sich gegenseitig überlappen, die Hüllkurve oder die Bearbeitungsfehlerform 22 gelöscht, durch die das Werkzeug 76 zuerst hindurchgeht.

[0083] Gemäß der dritten Ausführungsform kann bei der Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche das Zeichnen einer Hüllkurve, die durch die Bearbeitung verschwindet, oder einer Hüllkurve vermieden werden, die nicht gebildet wird, indem eine der benachbarten Hüllkurven aus dem Bereich gelöscht wird, in dem sich die benachbarten berechneten Hüllkurven befinden. Infolgedessen kann die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Qualität einer bearbeiteten Oberfläche genauer simulieren.

Vierte Ausführungsform

[0084] Bei der vierten Ausführungsform wird ein Fall beschrieben, in dem eine Simulation der Qualität der bearbeiteten Oberfläche für einen anderen Bearbeitungsfehler als einem Bearbeitungsfehler aufgrund einer Verformung der mechanischen Struktur 98 durchgeführt wird. Die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vierten Ausführungsform hat eine ähnliche Konfiguration wie die der dritten Ausführungsform. Bei der vierten Ausführungsform sind die Komponenten, die mit denen der ersten bis dritten Ausführungsform identisch sind, mit denselben Bezugszeichen versehen, und es werden hauptsächlich die Konfigurationsunterschiede zur ersten bis dritten Ausführungsform beschrieben. Bei der vierten Ausführungsform simuliert die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche ein Streifenmuster, das auf der bearbeiteten Oberfläche durch eine Vibration der mechanischen Struktur 98 verursacht wird.

[0085] Die Beschleunigung $A_{tcp}(s)$ des Werkzeugs 76 wird durch eine Übertragungsfunktion $G(s)$ mit der axialen Beschleunigung $A_{mot}(s)$ als Eingabe formuliert. Die Übertragungsfunktion $G(s)$ wird durch die nachstehende Formel (2) ausgedrückt. Dabei steht ζ für die Schwingungsdämpfung, ω für die Schwingungsfrequenz, K für das Amplitudenverhält-

nis und s für den Laplace-Operator.
Formel 2:

$$G(s) = \frac{A_{tcp}(s)}{A_{mot}(s)} = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (2)$$

[0086] **Fig. 25** zeigt eine Darstellung zur Erläuterung der bei der vierten Ausführungsform vorhergesagten Vibration des Werkzeugs 76. Der in **Fig. 25** dargestellte Kurvenverlauf ist die Vibration des Werkzeugs 76 aufgrund der Vibration der mechanischen Struktur 98 in Y-Richtung und repräsentiert die Vibration des Werkzeugs 76 in Y-Richtung. In dem in **Fig. 25** dargestellten Diagramm stellt die vertikale Achse die aus der Beschleunigung der Y-Achse geschätzte Werkzeugschwingung dar, und die horizontale Achse die Zeit. Bei dem Schwellenwert $Th3$ handelt es sich um einen Schwellenwert, der ein Kriterium für die Fehlerbestimmung ist, und er ist ein Schwellenwert für die Beschleunigung des Werkzeugs 76. In **Fig. 25** ist die Werkzeugschwingung mit der Beschleunigung am Schwellenwert $Th3$ durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Der Schwellenwert $Th3$ wird durch einen vorab durchgeführten Bearbeitungstest ermittelt.

[0087] Die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern verwendet die Achsenbeschleunigung als Eingabe und bestimmt die Beschleunigung des Werkzeugs 76 aus der Übertragungsfunktion $G(s)$. In dem Berechnungsschritt, in dem die Beschleunigung des Werkzeugs 76 den Schwellenwert $Th3$ überschreitet, entsteht aufgrund der Vibration des Werkzeugs 76 ein Streifenmuster.

[0088] **Fig. 26** zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der vierten Ausführungsform erzeugt wurde. **Fig. 26** zeigt ein Beispiel, in dem die kreisförmige Bearbeitungsfehlerform 22, die durch die Vibration des Werkzeugs 76 gebildet wird, dargestellt ist. Wie in **Fig. 26** gezeigt ist, werden mehrere Bearbeitungsfehlerformen 22 gebildet, die sich in Y-Richtung überlappen.

[0089] Es wird darauf hingewiesen, dass die Formel zur Bestimmung der Schwingungserzeugung und der Schwellenwert $Th3$ Beispiele sind, die in geeigneter Weise geändert werden können. Anstelle der oben beschriebenen Übertragungsfunktion $G(s)$ kann eine Übertragungsfunktion $G(s)$, die durch Formulieren der Verschiebung $Y_{tcp}(s)$ des Werkzeugs 76 unter Verwendung der Beschleunigung $A_{mot}(s)$ der Achse als Eingabe erhalten wird, als Formel zur Bestimmung des Auftretens von Vibrationen verwendet werden. Die Übertragungsfunktion $G(s)$, die durch die Formulierung der Verschiebung $Y_{tcp}(s)$ des Werkzeugs 76 unter Verwendung der Beschleunigung $A_{mot}(s)$ der Achse als Eingabe erhalten wird,

wird durch die nachstehende Formel (3) ausgedrückt. Der Schwellenwert, der das Kriterium für die Fehlerbestimmung ist, kann durch die Amplitude der Werkzeugschwingung bestimmt werden. Die Verschiebung $Y_{tcp}(s)$ ist eine Verschiebung aufgrund der Vibration in Y-Richtung.

Formel 3:

$$G(s) = \frac{Y_{tcp}(s)}{A_{mot}(s)} = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (3)$$

[0090] Bei der vierten Ausführungsform schwingt die mechanische Struktur 98 in Y-Richtung. Wenn die mechanische Struktur 98 in X-Richtung schwingt oder wenn die mechanische Struktur 98 in X-Richtung und in Y-Richtung schwingt, ist dies jedoch dem Fall ähnlich, in dem die mechanische Struktur 98 in Y-Richtung schwingt. Wenn die mechanische Struktur 98 in X-Richtung schwingt, wird das Auftreten von Bearbeitungsfehlern in X-Richtung bestimmt. Wenn die mechanische Struktur 98 in X- und Y-Richtung schwingt, wird das Auftreten von Bearbeitungsfehlern jeweils für die X- und Y-Richtung bestimmt.

[0091] Gemäß der vierten Ausführungsform kann die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Qualität der bearbeiteten Oberfläche unter Verwendung einer einfachen Formel vorhersagen.

[0092] Die Bearbeitungsfehlerform ist nicht beschränkt auf die Form eines Eindrucks, der durch Senken des Werkzeugs 76 in das Werkstück 78 während der Beschleunigung oder Verlangsamung der Achse verursacht wird, oder die Form eines Streifenmusters, das durch die Vibration des Werkzeugs 76 oder des Werkstücks 78 während der Beschleunigung oder Verlangsamung der Achse verursacht wird. Die Bearbeitungsfehlerform kann ein Unschärfemuster sein, das durch fehlenden Kontakt des Werkzeugs 76 mit dem Werkstück 78 verursacht wird, ein Wellenmuster, das durch eine diskontinuierliche Geschwindigkeit der Achse verursacht wird, oder dergleichen. Die Vorrichtung 1c zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche kann die Erscheinungsmerkmale der Bearbeitungsfehlerform, die die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt, entsprechend dem Aspekt des Bearbeitungsfehlers vorhersagen.

Fünfte Ausführungsform

[0093] Fig. 27 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der fünften Ausführungsform. Bei der fünften Ausführungsform sind die Komponenten, die mit denen der ersten bis vierten Ausführungsform identisch sind, mit denselben Bezugszeichen versehen, und es werden hauptsächlich die Konfigura-

tionsunterschiede zur ersten bis vierten Ausführungsform beschrieben. Die Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst eine Zeicheneinheit 13b, die sich von der Zeicheneinheit 13a der ersten bis vierten Ausführungsform unterscheidet. Die Zeicheneinheit 13b führt eine Darstellungsprozedur zum Aufbringen der Bearbeitungsfehlerform auf die Oberfläche des dreidimensionalen Formmodells durch, das die Form des Werkstücks 78 nach der Bearbeitung darstellt.

[0094] Bei der fünften Ausführungsform werden Achsendaten von einem Simulator 100 anstelle der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 in die Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern eingegeben. Der Simulator 100 ist eine Software, die das Verhalten der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 simuliert. Der Simulator 100 simuliert unter Verwendung des Bearbeitungsprogramms das Verhalten der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99, wenn die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 99 eine Bearbeitung durchführt. Konkret berechnet der Simulator 100 einen Positionsbefehl, einen Geschwindigkeitsbefehl und einen Beschleunigungsbefehl aus dem Bearbeitungsprogramm. Der Simulator 100 sagt die Positionsrückmeldung, die Geschwindigkeitsrückmeldung und die Beschleunigungsrückmeldung aus dem Bearbeitungsprogramm voraus.

[0095] Der Simulator 100 ist eine Software, die die Funktion der numerischen gesteuerten Werkzeugmaschine 99 simuliert. Der Simulator 100 kann eine Übertragungsfunktion oder eine mathematische Formel zur Simulation der Eigenschaft jeder in der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 enthaltenen Achse sein. Der Simulator 100 kann eine künstliche Intelligenz sein, die einen Positionsbefehl, einen Geschwindigkeitsbefehl und einen Beschleunigungsbefehl als Eingaben verwendet und eine Positionsrückmeldung, eine Geschwindigkeitsrückmeldung und eine Beschleunigungsrückmeldung lernt.

[0096] Dreidimensionale CAD (Computer Aided Design)-Informationen, d. h. dreidimensionale Formdaten, und die von der Einheit 12b zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche berechnete Bearbeitungsfehlerform werden in die Zeicheneinheit 13b eingegeben. Die dreidimensionalen CAD-Informationen stellen die Form des Werkstücks 78 nach der Bearbeitung dar. Die Zeicheneinheit 13b zeichnet ein dreidimensionales Formmodell, das die Form des Werkstücks 78 nach der Bearbeitung darstellt, auf Basis der dreidimensionalen CAD-Informationen. Die Zeicheneinheit 13b zeichnet ein dreidimensionales Formmodell, das simuliert, wie das Werkstück 78 unter einem vorgegebenen Blickwinkel aussieht, und überlagert auf der Oberfläche des dreidimensionalen Formmodells die Bearbeitungsfehlerform eines Bearbeitungsfehlers, der die Qualität der

bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt. Auf diese Weise führt die Zeicheneinheit 13b einen Zeichenvorgang durch, bei dem die Bearbeitungsfehlerform auf die Oberfläche des dreidimensionalen Formmodells aufgebracht wird, das die Form des Werkstücks 78 nach der Bearbeitung darstellt.

[0097] Fig. 28 zeigt eine Darstellung zur Veranschaulichung eines Beispiels für ein Bild, das von einer Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der fünften Ausführungsform erzeugt wurde. Fig. 28 zeigt ein Beispiel für ein Bild, in dem die Bearbeitungsfehlerform 22 bei einem pyramidenförmigen dreidimensionalen Formmodell aufgebracht wird, das das Werkstück 78 nach der Bearbeitung darstellt. Ein Linienbild, das die Erscheinungsmerkmale der Bearbeitungsfehlerform 22 simuliert, wird an einer Stelle aufgebracht, an der ein Bearbeitungsfehler festgestellt wurde, der die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt.

[0098] Wenn die Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der fünften Ausführungsform mit dem Simulator 100 anstelle der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 verbunden ist, kann die Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Qualität der bearbeiteten Oberfläche unter Verwendung des Ergebnisses der Simulation des Verhaltens der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 vorhersagen. Darüber hinaus kann die Vorrichtung 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Erscheinungsmerkmale der Bearbeitungsfehlerform 22 an dem Werkstück 78 nach der Bearbeitung leichter vorhersagen, indem sie die Bearbeitungsfehlerform 22 auf dem dreidimensionalen Formmodell aufbringt.

Sechste Ausführungsform

[0099] Fig. 29 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Konfiguration einer Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der sechsten Ausführungsform. Bei der sechsten Ausführungsform sind die Komponenten, die mit denen der ersten bis fünften Ausführungsform identisch sind, mit den gleichen Bezugszeichen versehen, und es werden hauptsächlich die Konfigurationsunterschiede zur ersten bis fünften Ausführungsform beschrieben. Die Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche unterscheidet sich von den Vorrichtungen 1a, 1b, 1c und 1d zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der ersten bis fünften Ausführungsform dadurch, dass eine Maschinenlernvorrichtung 110 enthalten ist. Die Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst eine Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, die sich von der

Einheit 11a zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern der ersten bis fünften Ausführungsform unterscheidet.

[0100] Ein Trainingsdatensatz, der Achsendaten und Informationen über Bearbeitungsbedingungen enthält, wird in die Maschinenlernvorrichtung 110 eingegeben. Informationen über die Position des Auftretens von Bearbeitungsfehlern werden in die Maschinenlernvorrichtung 110 eingegeben. Die Bearbeitungsbedingungeninformationen umfassen Informationen wie die Form des Werkstücks 78, das Material des Werkstücks 78, den Werkzeugdurchmesser, das Werkzeugmaterial, die Werkzeugform, die Anzahl der Schnitten, den Vorschub pro Schneide, die Drehzahl des Werkzeugs 76, Informationen über die mechanische Struktur, Informationen über die Werkzeugreibung und die Werkzeugeinsatzzeit. Die Informationen über die mechanische Struktur sind Informationen, die die Konfiguration der mechanischen Struktur 98 charakterisieren. Es wird ein Trainingsdatensatz erstellt, in dem eine Beschleunigungs-/Verzögerungszeitkonstante, ein Geschwindigkeitsbefehl und Bearbeitungsbedingungeninformationen für jede Position der Achse mit jedem Wert der Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Achse verknüpft sind.

[0101] Fig. 30 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Konfiguration einer Maschinenlernvorrichtung 110, die in einer Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche gemäß der sechsten Ausführungsform enthalten ist. Die Maschinenlernvorrichtung 110 umfasst eine Zustandsbeobachtungseinheit 101 und eine Lerneinheit 102. Die Zustandsbeobachtungseinheit 101 beobachtet den Trainingsdatensatz, der die Achsendaten und die Bearbeitungsbedingungeninformationen und die Informationen über die Position des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers als Zustandsvariablen enthält. Die Informationen über die Position des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers umfassen ein tatsächliches Bestimmungsergebnis für das Auftreten eines Bearbeitungsfehlers. Die Zustandsbeobachtungseinheit 101 beobachtet die Achsendaten, die Bearbeitungsbedingungeninformationen und das tatsächliche Bestimmungsergebnis für das Auftreten eines Bearbeitungsfehlers als Zustandsvariablen. Die Lerneinheit 102 lernt die Beziehung zwischen einem Bestimmungswert zur Bestimmung des Auftretens oder Nichtauftretens eines Bearbeitungsfehlers und der Bearbeitungsbedingung gemäß dem Trainingsdatensatz.

[0102] Die Lerneinheit 102 kann jeden beliebigen Lernalgorithmus verwenden. Ein Beispiel, bei dem die Lerneinheit 102 Verstärkungslernen als Lernalgorithmus verwendet, wird hier beschrieben. Beim Verstärkungslernen beobachtet ein Agent (Subjekt einer Handlung) in einer Umgebung den aktuellen Zustand

und bestimmt die zu ergreifende Aktion. Der Agent erhält eine Belohnung von der Umgebung durch Auswählen einer Aktion und lernt, wie er diese Belohnung durch eine Reihe von Aktionen maximieren kann. Q-Learning und TD-Learning sind als repräsentative Methoden des Verstärkungslernens bekannt. Im Falle des Q-Learning wird beispielsweise eine Aktionswerttabelle, die ein allgemeiner Aktualisierungsausdruck für die Aktionswertfunktion $Q(s, a)$ ist, durch die folgende Formel (4) ausgedrückt. Die Aktionswertfunktion $Q(s, a)$ stellt einen Aktionswert Q dar, der der Wert der Aktion der Auswahl der Aktion „a“ in der Umgebung „s“ ist. Formel 4:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha (r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)) \quad (4)$$

[0103] In Formel (4) steht „ s_{t+1} “ für die Umgebung zum Zeitpunkt „t“. Dabei steht „ a_t “ für die Aktion zum Zeitpunkt „t“. Die Umgebung ändert sich zu „ s_{t+1} “ als Ergebnis der Durchführung der Aktion „ a_t “. Darüber hinaus steht „ r_{t+1} “ für die Belohnung, die durch die Veränderung der Umgebung erzielt werden kann. Darüber hinaus steht „ γ “ für einen Diskontierungsfaktor. Ferner bedeutet „ α “ einen Lernkoeffizienten. Im Falle der Anwendung von Q-Learning ist die Aktion „ a_t “ ein Bestimmungswert für den Bearbeitungsfehler.

[0104] Der durch Formel (4) dargestellte Aktualisierungsausdruck erhöht den Aktionswert Q , wenn der Aktionswert der besten Aktion „a“ zum Zeitpunkt „t+1“ größer ist als der Aktionswert Q der zum Zeitpunkt „t“ ausgeführten Aktion „a“, und verringert andernfalls den Aktionswert Q . Die Aktionswertfunktion $Q(S, a)$ wird anders ausgedrückt so aktualisiert, dass der Aktionswert Q der Aktion „a“ zum Zeitpunkt „t“ dem besten Aktionswert zum Zeitpunkt „t+1“ angenähert wird. Infolgedessen überträgt sich der beste Aktionswert in einer bestimmten Umgebung sequentiell auf die Aktionswerte in den vorherigen Umgebungen.

[0105] Die Lerneinheit 102 umfasst eine Belohnungsberechnungseinheit 103 und eine Funktionsaktualisierungseinheit 104. Die Belohnungsberechnungseinheit 103 berechnet eine Belohnung auf der Grundlage von Zustandsvariablen. Die Funktionsaktualisierungseinheit 104 aktualisiert eine Funktion zur Bestimmung eines Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler entsprechend der von der Belohnungsberechnungseinheit 103 berechneten Belohnung.

[0106] Konkret berechnet die Belohnungsberechnungseinheit 103 die Belohnung „r“ auf Basis des Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler, der von der Einheit 11b zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern ausgegeben wird, und

dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein eines tatsächlich beobachteten Bearbeitungsfehlers. Wenn beispielsweise der Bestimmungswert für einen Bearbeitungsfehler mit dem tatsächlichen Bestimmungsergebnis des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers als Ergebnis der Änderung der Bearbeitungsbedingungen übereinstimmt, erhöht die Belohnungsberechnungseinheit 103 die Belohnung „r“. Die Belohnungsberechnungseinheit 103 erhöht die Belohnung „r“, indem sie „1“ als Wert der Belohnung angibt. Es wird darauf hingewiesen, dass der Wert der Belohnung nicht auf „1“ beschränkt ist. Wenn der Bestimmungswert für einen Bearbeitungsfehler nicht mit dem tatsächlichen Bestimmungsergebnis des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers als Ergebnis der Änderung der Bearbeitungsbedingung übereinstimmt, reduziert die Belohnungsberechnungseinheit 103 die Belohnung „r“. Die Belohnungsberechnungseinheit 103 reduziert die Belohnung „r“, indem sie „-1“ als Wert der Belohnung angibt. Es wird darauf hingewiesen, dass der Wert der Belohnung nicht auf „-1“ beschränkt ist.

[0107] Die Lerneinheit 102 bezieht das Ergebnis der tatsächlichen Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers aus den Informationen über die Position des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers. Das tatsächliche Bestimmungsergebnis des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers kann das Ergebnis einer Arbeitskraft sein, die das Auftreten eines Bearbeitungsfehlers bestimmt, indem diese visuell feststellt, ob ein Bearbeitungsfehler aufgetreten ist. Für das tatsächliche Ergebnis der Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern können Informationen über die Größe des Bearbeitungsfehlers verwendet werden, die aus den Unebenheitsinformationen der bearbeiteten Oberfläche extrahiert werden. Die Informationen über die Unebenheiten der bearbeiteten Oberfläche werden mit Hilfe eines Geräts wie einer dreidimensionalen Koordinatenmessmaschine (CMM) oder eines Mikroskops erfasst.

[0108] Die Funktionsaktualisierungseinheit 104 aktualisiert eine Funktion, bei der es sich um ein Bestimmungsmodell zur Bestimmung eines Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler handelt, entsprechend der von der Belohnungsberechnungseinheit 103 berechneten Belohnung. Die Aktualisierung der Funktion kann entsprechend dem Trainingsdatensatz durchgeführt werden, zum Beispiel durch Aktualisierung der Aktionswerttabelle. Die Aktionswerttabelle ist ein Datensatz, in dem eine Aktion verknüpft mit ihrem Aktionswert in Form einer Tabelle gespeichert ist. Im Falle des Q-Learnings wird beispielsweise die durch Formel (4) dargestellte Aktionswertfunktion $Q(s_t, a_t)$ als Funktion zur Bestimmung des Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler verwendet.

[0109] Auch wenn oben beschrieben wurde, dass Verstärkungslernen auf den von der Lerneinheit 102 verwendeten Lernalgorithmus angewandt wird, kann auch anderes Lernen als Verstärkungslernen auf den Lernalgorithmus angewandt werden. Die Lerneinheit 102 kann maschinelles Lernen unter Verwendung eines von Verstärkungslernen verschiedenen bekannten Lernalgorithmus ausführen, z. B. eines Lernalgorithmus wie Deep Learning, eines neuronalen Netzwerks, genetischer Programmierung, induktiver Logikprogrammierung oder einer Support-Vektor-Maschine.

[0110] Die Lerneinheit 102 kann einen Trainingsdatensatz konstruieren, der Informationen über alle Achsen der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 umfasst, und ein Bestimmungsmodell zur Bestimmung eines Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler erlernen, oder sie kann einen Trainingsdatensatz für jede Achse der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 99 konstruieren und ein Bestimmungsmodell für jede Achse zur Bestimmung eines Bestimmungswertes für einen Bearbeitungsfehler erlernen.

[0111] Die Lerneinheit 102 ist nicht auf die in der Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche eingebaute Einheit beschränkt. Die Lerneinheit 102 kann durch eine Vorrichtung außerhalb der Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche implementiert werden. In diesem Fall kann die Vorrichtung, die als Lerneinheit 102 fungiert, eine Vorrichtung sein, die über ein Netzwerk mit der Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche verbunden werden kann. Die Vorrichtung, die als Lerneinheit 102 fungiert, kann eine Vorrichtung auf einem Cloud-Server sein. Die Maschinenlernvorrichtung 110 wird ähnlich wie in **Fig. 17** durch den Prozessor 202 und den Speicher 203 oder ähnlich wie in **Fig. 18** die Verarbeitungsschaltung 206 implementiert.

[0112] Die Maschinenlernvorrichtung 110 gibt ein Bestimmungsmodell, das ein Lernergebnis in der Lerneinheit 102 ist, an die Einheit 11b zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern aus. Die Einheit 11b zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern berechnet auf Basis des Bestimmungsmodells einen Bestimmungswert. Die Einheit 11b zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern bestimmt auf Basis des berechneten Bestimmungswerts, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, der die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt.

[0113] Gemäß der sechsten Ausführungsform kann die Vorrichtung 1e zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche die Beziehung zwischen dem Bestimmungswert für einen Bearbeitungsfehler und der Bearbeitungsbedingung erlernen, um das

Auftreten von Bearbeitungsfehlern, die die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigen, mit hoher Genauigkeit vorherzusagen, wenn sich die Bedingung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers, der die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt, entsprechend der Bearbeitungsbedingung komplex verändert.

[0114] Die in den oben genannten Ausführungsbeispielen beschriebenen Konfigurationen zeigen Beispiele für den Inhalt der vorliegenden Offenbarung. Die Konfigurationen der Ausführungsformen können mit einer anderen bekannten Technik kombiniert werden. Die Konfigurationen der Ausführungsformen können in geeigneter Weise miteinander kombiniert werden. Einige der Konfigurationen der Ausführungsformen können weggelassen oder geändert werden, ohne vom Kern der vorliegenden Offenbarung abzuweichen.

Bezugszeichenliste

1a, 1b, 1c, 1d, 1e	Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche;
2	Drehwinkeldetektor;
6a	Servosteuereinheit;
9	Befehlswertberechnungseinheit;
11a, 11b	Einheit zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern;
12a, 12b, 12c	Einheit zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche;
13a, 13b	Zeicheneinheit;
20, 22	Bearbeitungsfehlerform;
21	Bewegungsrichtung;
23	Drehrichtung;
24	Trajektorie;
25	Radiusschaftfräser;
26	Kugelschaftfräser;
27	Kreisform;
30	Hüllkurve;
71	Motor;
72	Führungsmechanismus;
73	Vorschubspindel;

74	Kupplung;
75a, 75b	Stützlager;
76	Werkzeug;
77	Arbeitstisch;
78	Werkstück;
79	Untersetzung;
80	Mutter;
83	Spindel;
90	Halterung;
93V	V-Achsen-Antriebs- einheit;
93X	X-Achsen-Antriebs- einheit;
93Y	Y-Achsen-Antriebs- einheit;
93Z	Z-Achsen-Antriebs- einheit;
96	mechanische Gerä- teeinheit;
97	Antriebsmechanis- mus;
98	mechanische Struk- tur;
99	numerisch gesteuerte Werk- zeugmaschine;
100	Simulator;
101	Zustandsbeobach- tungseinheit;
102	Lerneinheit;
103	Belohnungsberech- nungseinheit;
104	Funktionsaktualisie- rungseinheit;
110	Maschinenlernvor- richtung;
200	Steuerschaltung;
201	Eingabeeinheit;
202	Prozessor;
203	Speicher;
204	Ausgabeeinheit;
205	Hardwareschaltung;
206	Verarbeitungsschal- tung.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- JP 2010237843 [0004]

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zum Simulieren von Erscheinungsmerkmalen einer bearbeiteten Oberfläche eines Werkstücks, das mit einer Werkzeugmaschine bearbeitet wird, bei der eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bearbeitungsprogramm angesteuert wird, wobei die Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst:

eine Einheit zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern, um auf Basis von Achsendaten, bei denen es sich um Daten über den Betrieb der Achse handelt, zu bestimmen, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, der vorgegeben ist und das Erscheinungsbild charakterisiert;

eine Einheit zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche, um eine Bearbeitungsfehlerform, die durch einen Bearbeitungsfehler verursacht wird, auf Basis einer Bearbeitungsbedingung, unter der die Werkzeugmaschine das Werkstück bearbeitet, und einer Achsenposition zu berechnen; und
eine Zeicheneinheit, um die berechnete Bearbeitungsfehlerform darzustellen.

2. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach Anspruch 1, wobei ein von der Zeicheneinheit gezeichnetes Bild ein zweidimensionales Bild ist.

3. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach Anspruch 1, wobei die Zeicheneinheit eine Zeichenprozedur zum Aufbringen der Bearbeitungsfehlerform auf eine Oberfläche eines dreidimensionalen Formmodells durchführt, das die Form eines Werkstücks nach der Bearbeitung darstellt.

4. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Einheit zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern bestimmt, dass ein Bearbeitungsfehler auftritt, wenn die Beschleunigung der Achse oder die Geschwindigkeitsabweichung der Achse einen Schwellenwert überschreitet, der in Verbindung mit der Achse und dem Bearbeitungsfehler festgelegt wurde.

5. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 4, die aufweist:

eine Zustandsbeobachtungseinheit, um als Zustandsvariablen die Achsendaten, Informationen über den Bearbeitungszustand und ein tatsächliches Ergebnis für eine Bestimmung des Auftretens eines Bearbeitungsfehlers zu beobachten; und
eine Lerneinheit zum Erlernen einer Beziehung zwischen einem Bestimmungswert zum Bestimmen, ob der Bearbeitungsfehler auftritt, und der Bearbei-

tungsbedingung entsprechend einem auf Basis der Zustandsvariablen erzeugten Datensatz, wobei die Einheit zur Bestimmung des Auftretens von Bearbeitungsfehlern auf Basis eines Bestimmungswertes bestimmt, der auf Basis eines Lernergebnisses in der Lerneinheit berechnet wird, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt.

6. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Einheit zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche als Bearbeitungsfehlerform eine Fehlertrajektorie berechnet, die eine Trajektorie eines Werkzeugs ist, das für die Bearbeitung verwendet wird, und an der der Bearbeitungsfehler auftritt.

7. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Bearbeitungsfehlerform die Form eines Eindrucks, der durch Senken eines für die Bearbeitung verwendeten Werkzeugs in das Werkstück während der Beschleunigung oder Verlangsamung der Achse verursacht wird, die Form eines Streifenmusters, das durch Vibration des Werkzeugs oder des Werkstücks während der Beschleunigung oder Verlangsamung der Achse verursacht wird, ein Unschärfemuster, das durch fehlenden Kontakt des Werkzeugs mit dem Werkstück verursacht wird, oder ein Wellenmuster aufweist, das durch eine diskontinuierliche Geschwindigkeit der Achse verursacht wird.

8. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei

die Einheit zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche eine Hüllkurve, die eine Trajektorie darstellt, entlang der die äußere Form eines für die Bearbeitung verwendeten Werkzeugs verläuft, für einen Bereich berechnet, für den bestimmt wurde, dass er keinen Bearbeitungsfehler umfasst, und die Zeicheneinheit die berechnete Bearbeitungsfehlerform und die berechnete Hüllkurve darstellt.

9. Vorrichtung zur Simulation der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche nach Anspruch 8, wobei die Einheit zur Berechnung der Form der bearbeiteten Oberfläche von benachbarten Hüllkurven eine der benachbarten Hüllkurven, bei denen es sich um aneinander angrenzende Hüllkurven handelt, aus einem Bereich löscht, in dem sich die berechneten benachbarten Hüllkurven befinden.

10. Verfahren zur Anzeige der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche zum Darstellen eines Bildes, das die Erscheinungsmerkmale einer bearbeiteten Oberfläche eines Werkstücks simuliert, das mit einer Werkzeugmaschine bearbeitet wird, bei der eine Achse in Übereinstimmung mit einem Bear-

beitungsprogramm angesteuert wird, wobei das Verfahren zur Anzeige der Qualität einer bearbeiteten Oberfläche umfasst:

einen Schritt, um auf Basis von Achsendaten, bei denen es sich um Daten über den Betrieb der Achse handelt, zu bestimmen, ob ein Bearbeitungsfehler auftritt, der vorgegeben ist und das Erscheinungsbild charakterisiert;

einen Schritt, um eine Bearbeitungsfehlerform, die durch einen Bearbeitungsfehler verursacht wird, auf Basis einer Bearbeitungsbedingung, unter der die Werkzeugmaschine das Werkstück bearbeitet, und einer Achsenposition zu berechnen; und einen Schritt, um die berechnete Bearbeitungsfehlerform darzustellen.

Es folgen 26 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG.1

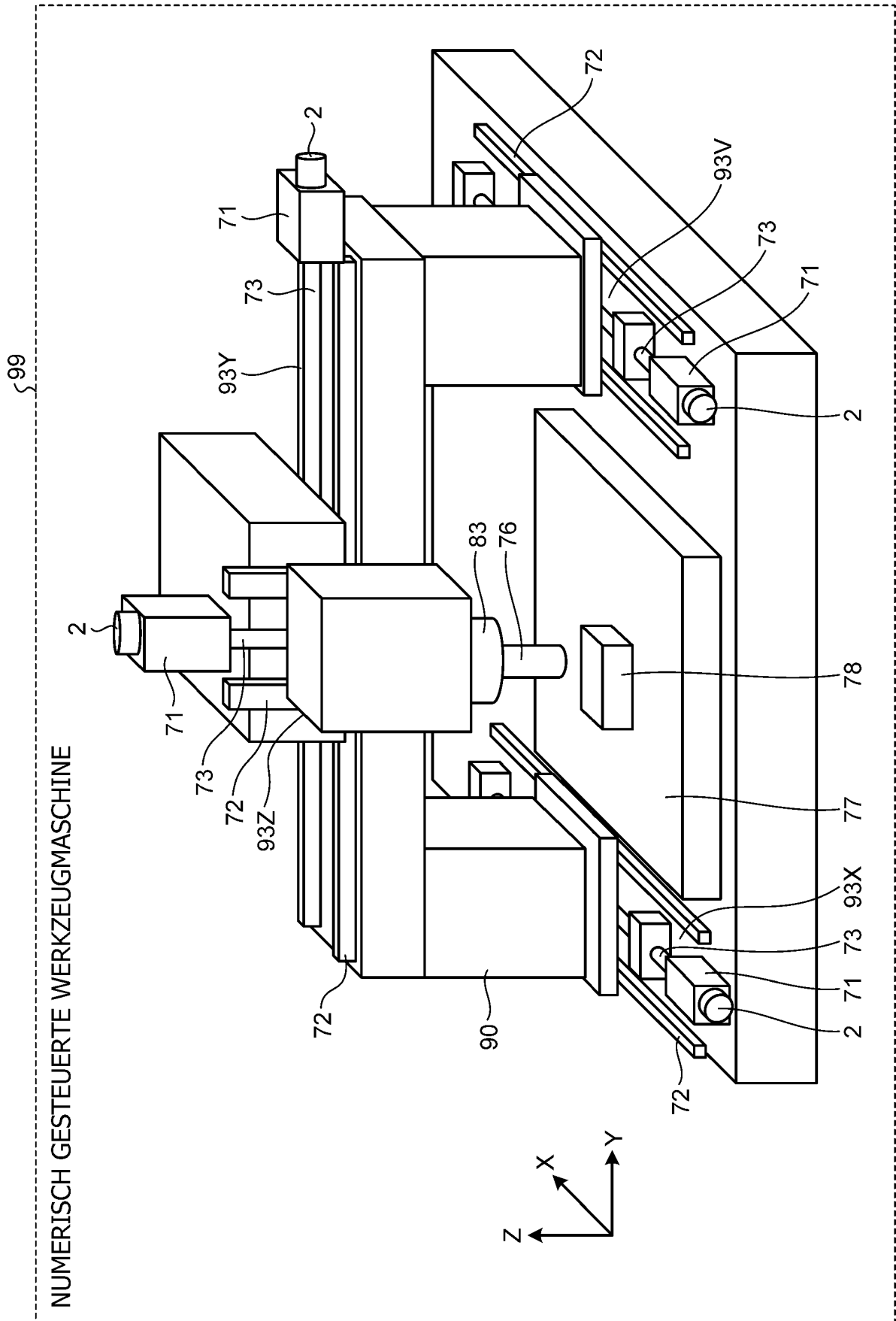


FIG. 2

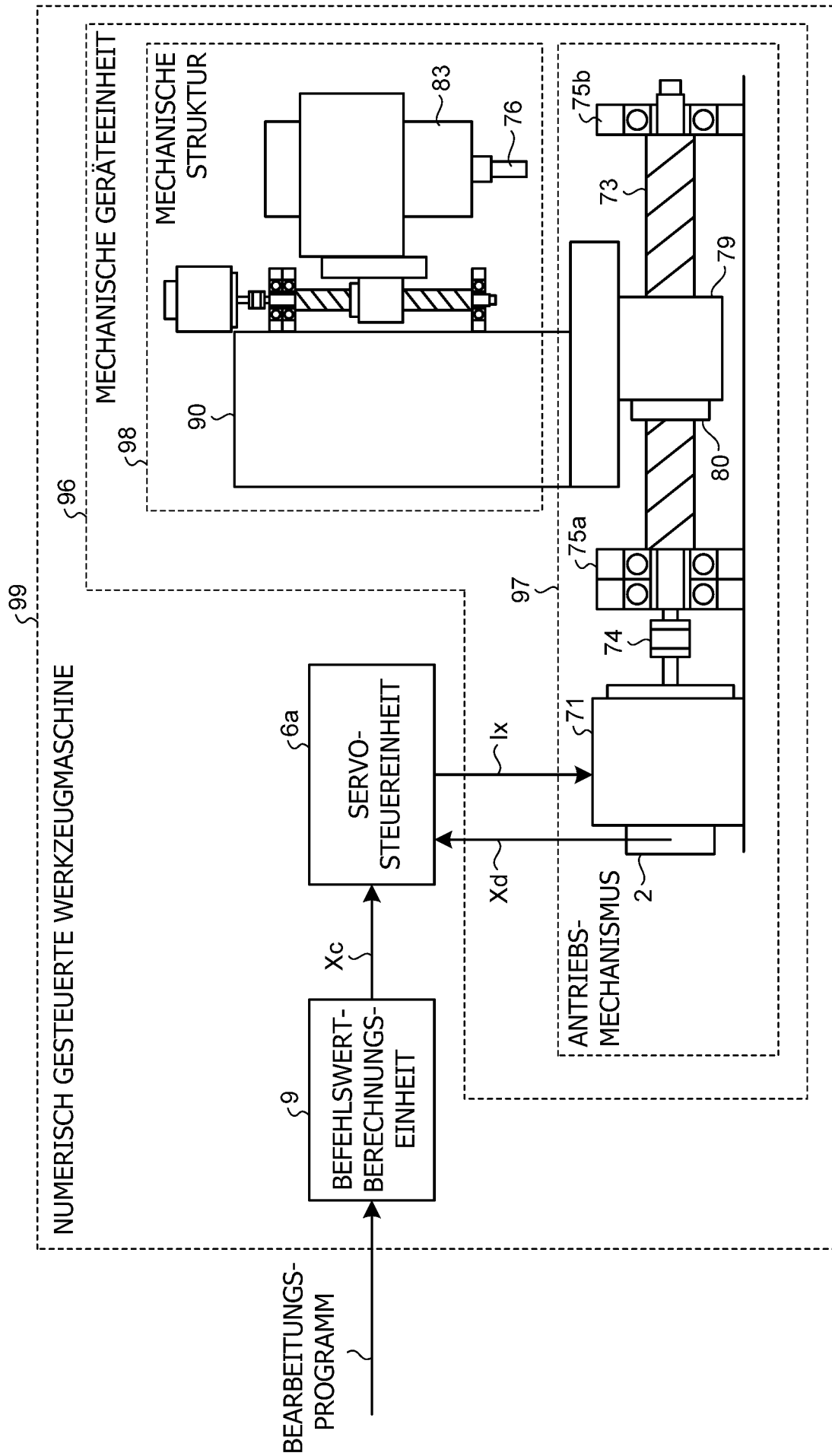


FIG.3

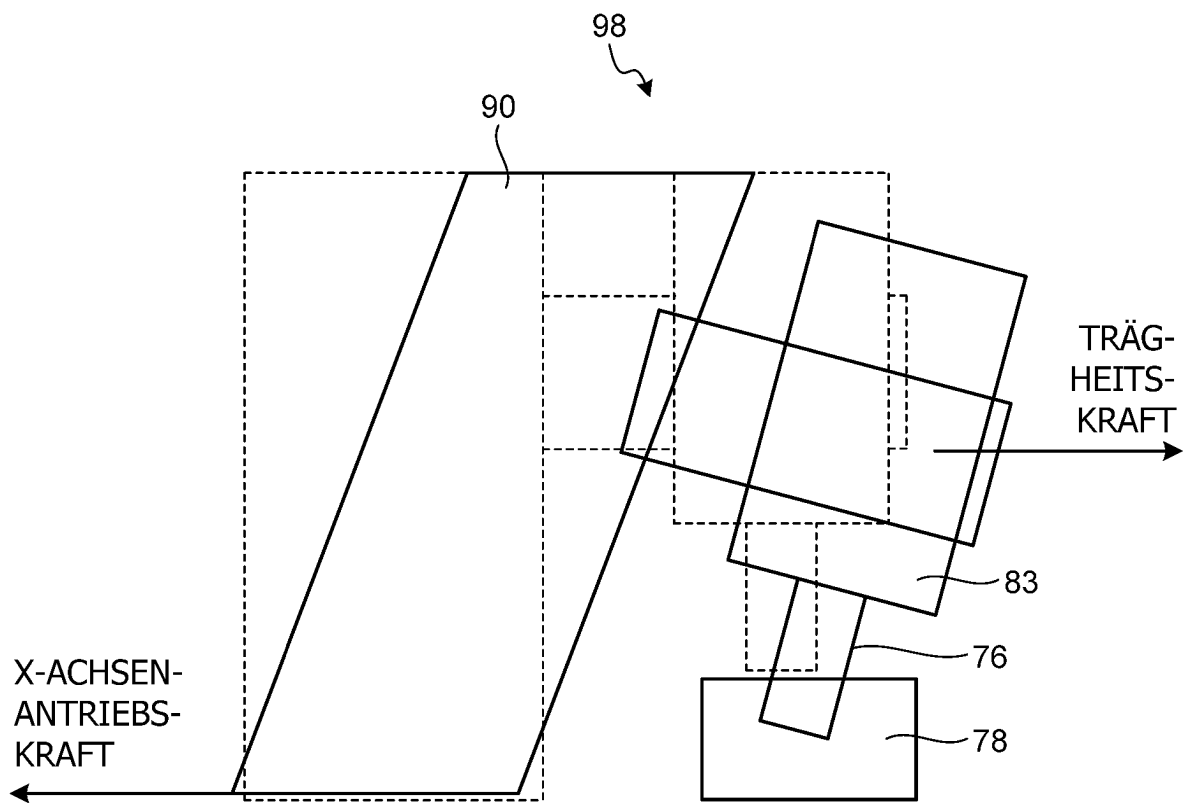


FIG.4

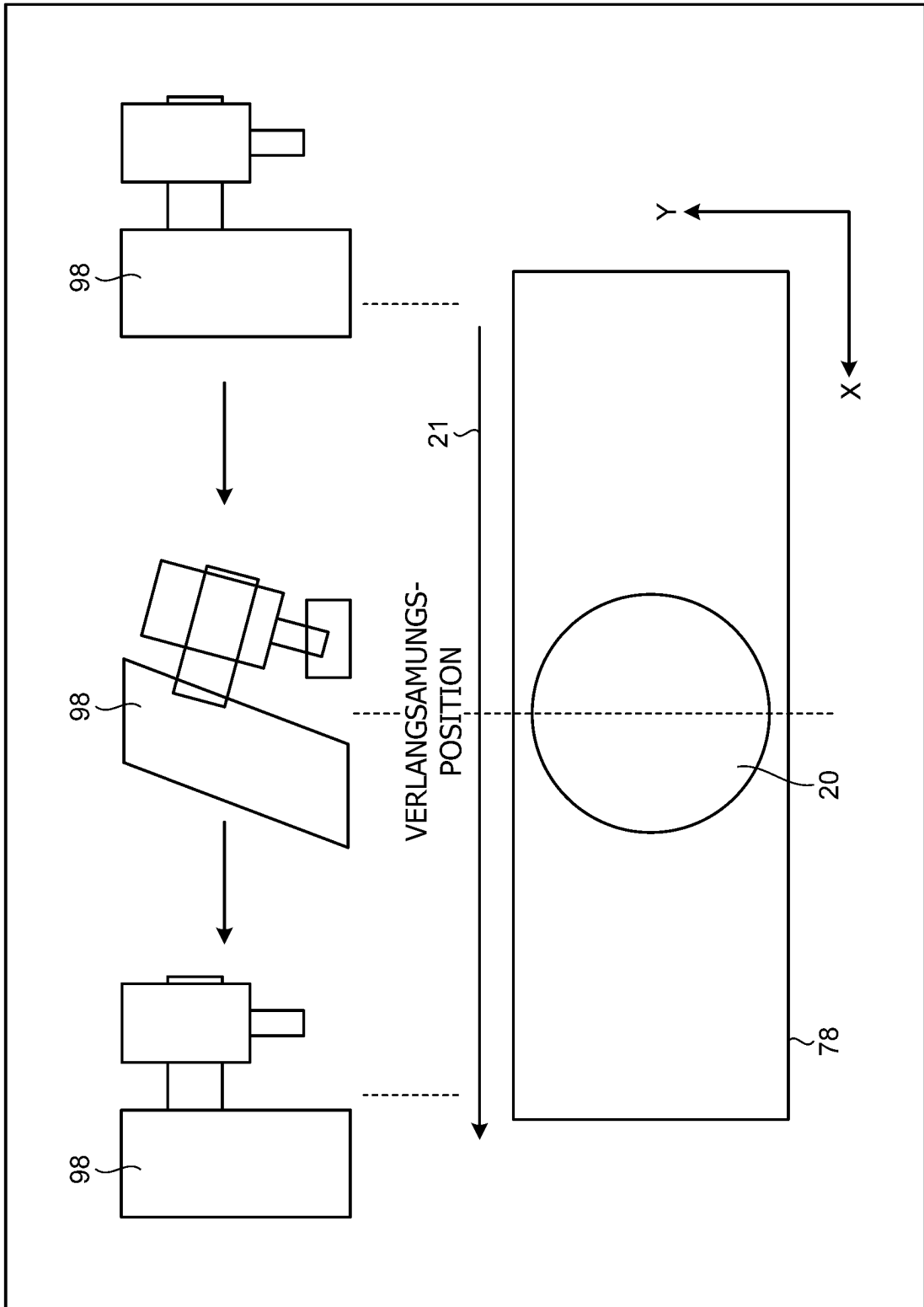


FIG.5

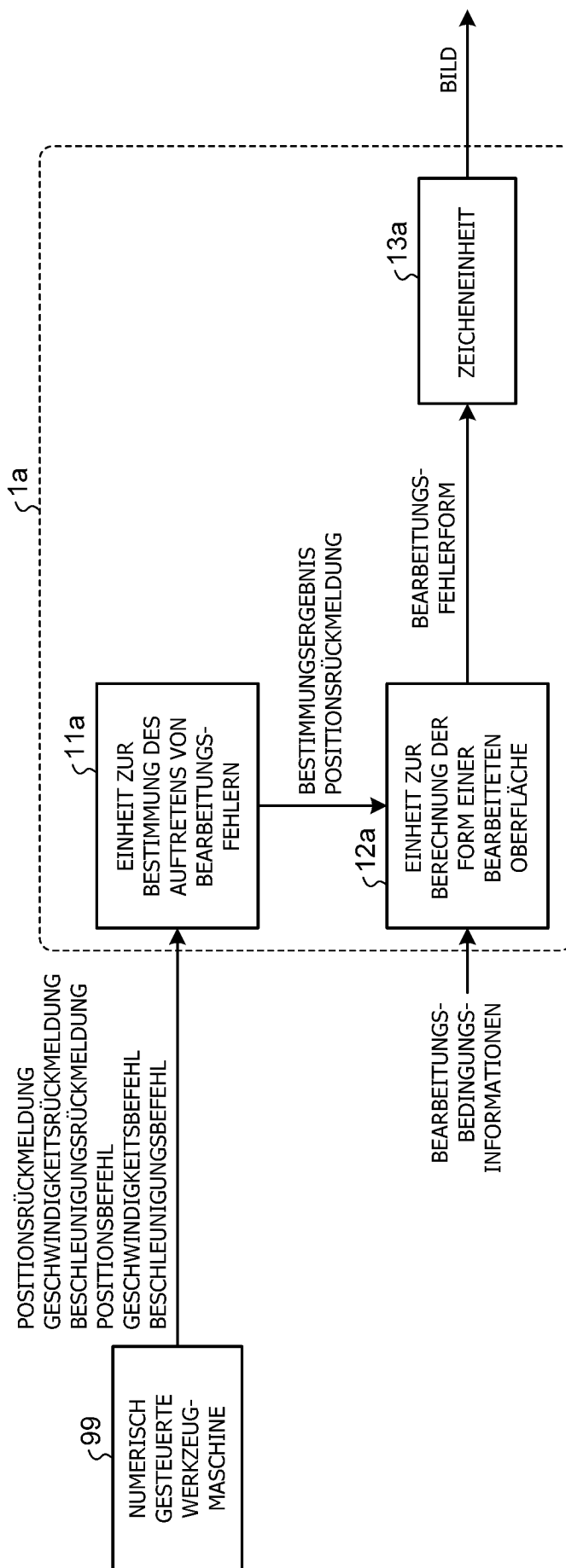


FIG.6

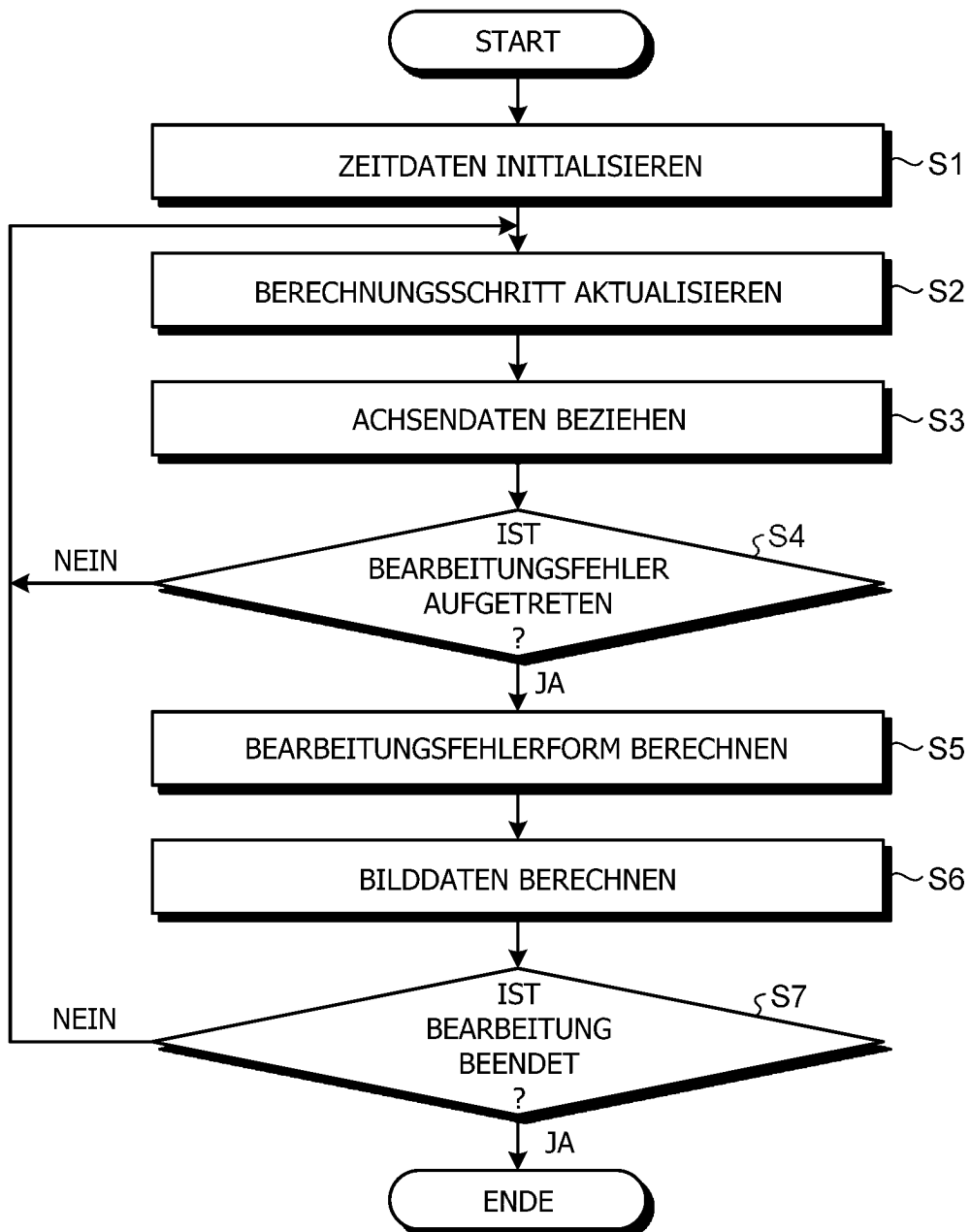


FIG.7

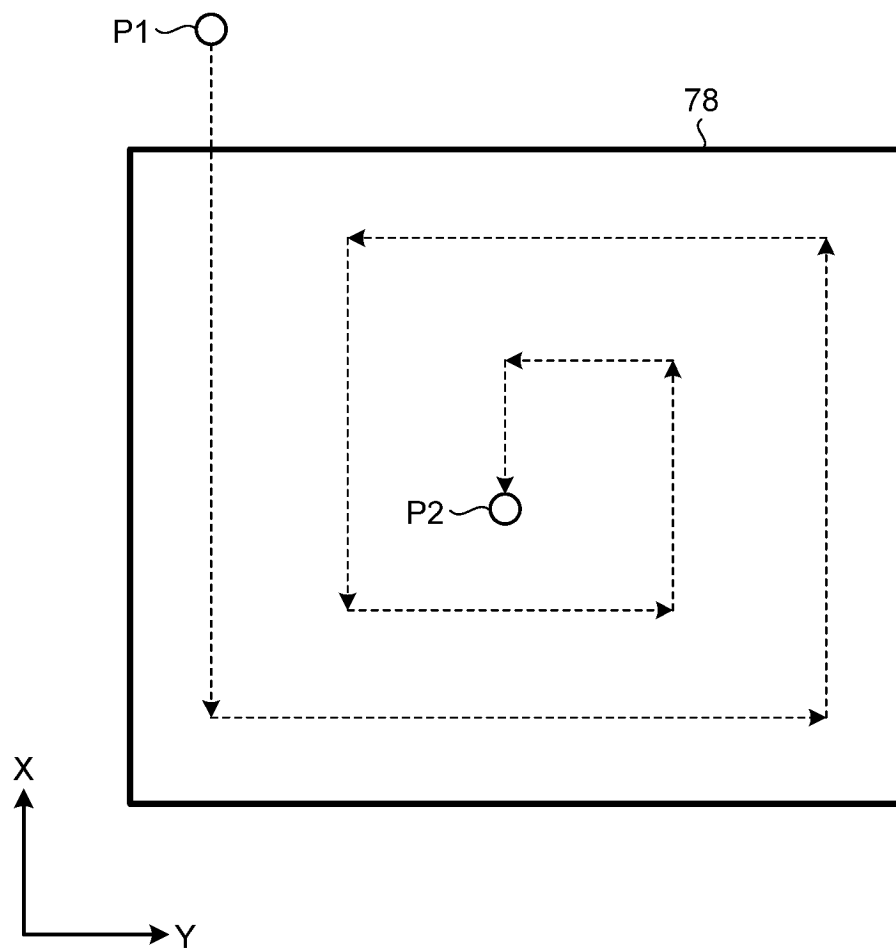


FIG.8

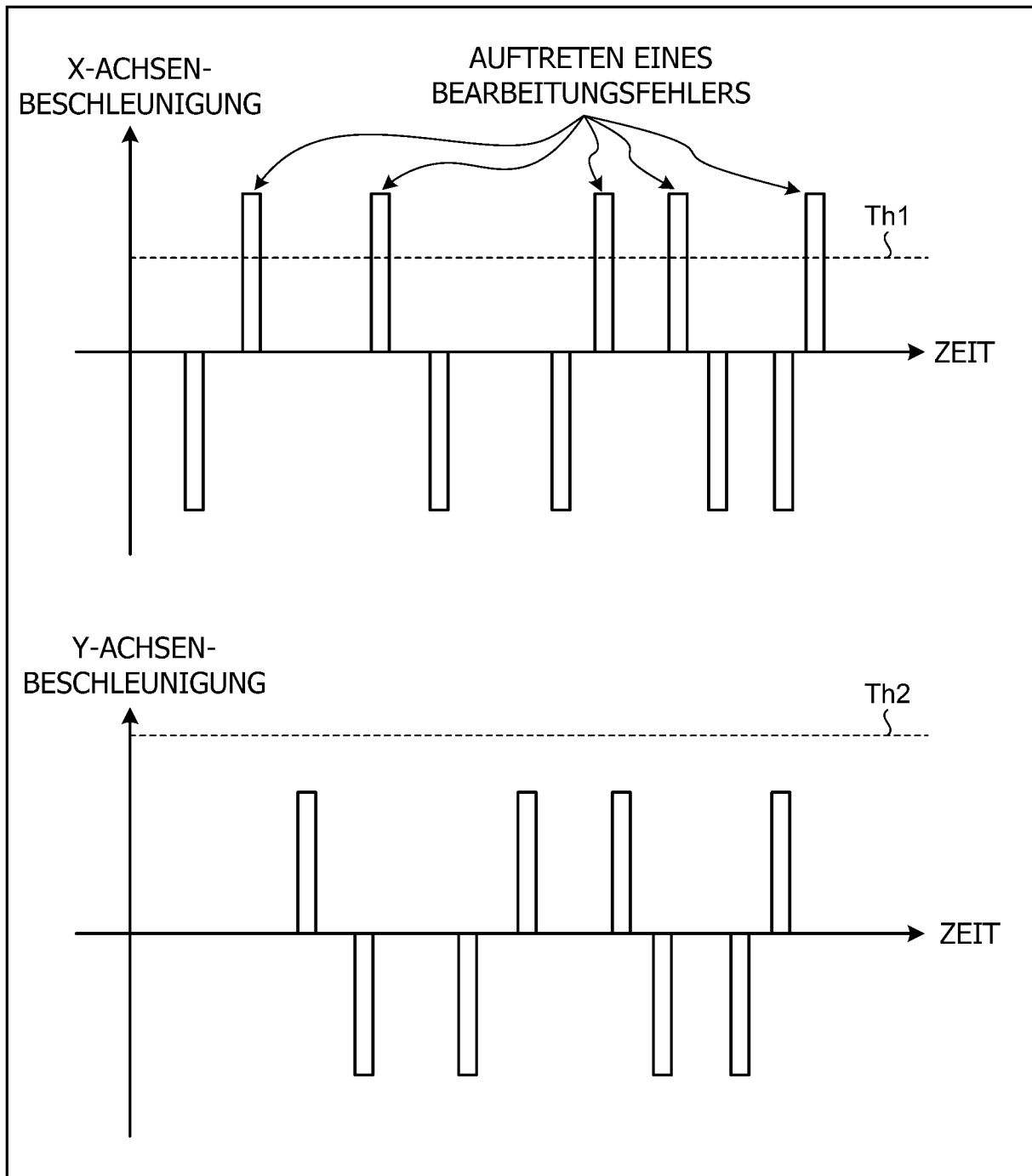


FIG.9

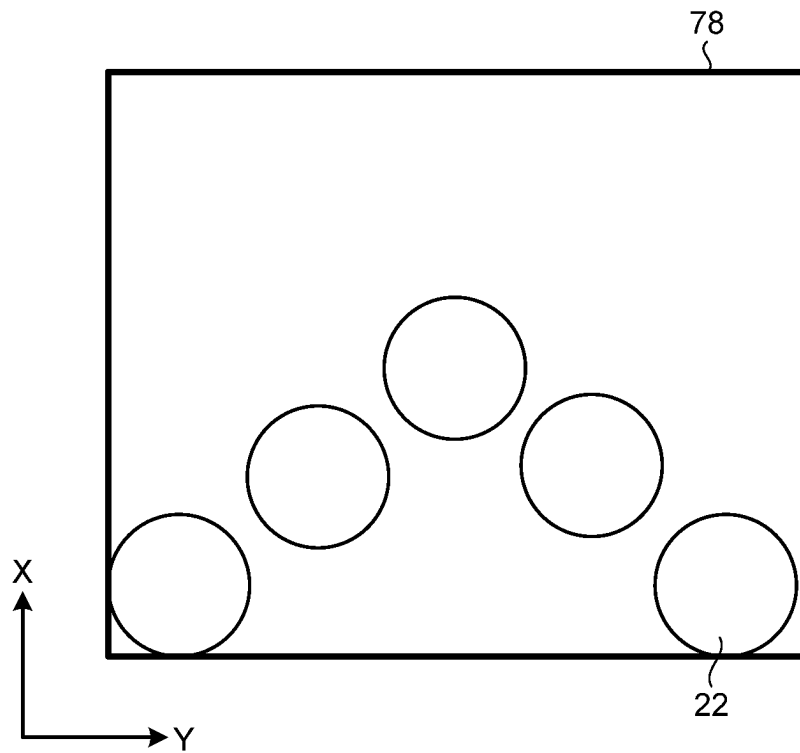


FIG.10

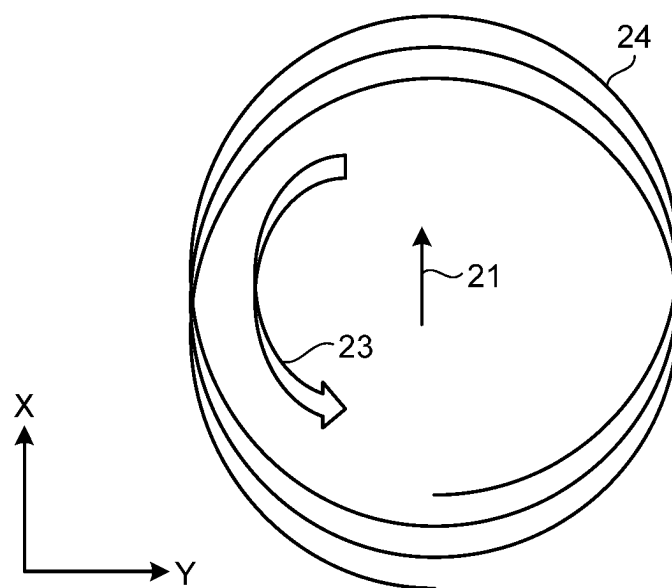


FIG.11

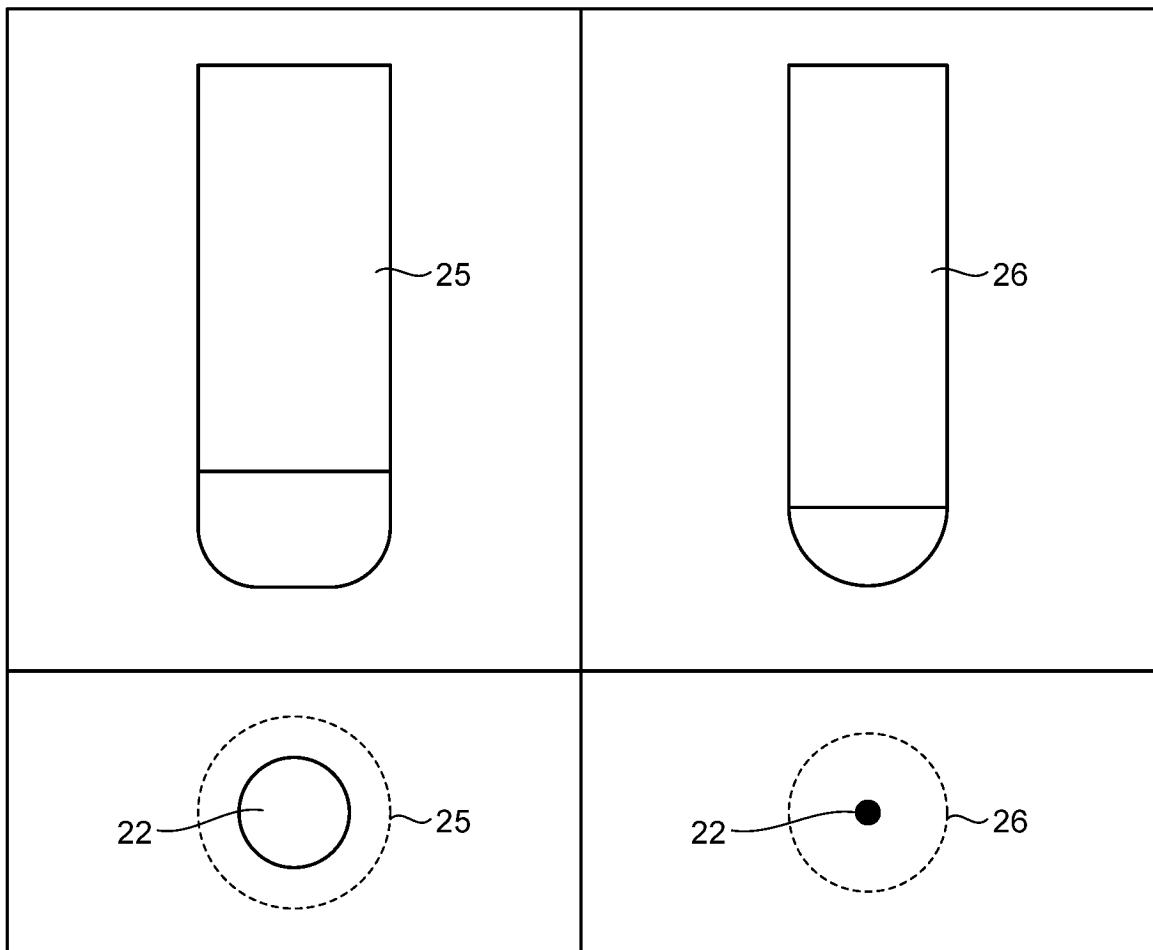


FIG.12

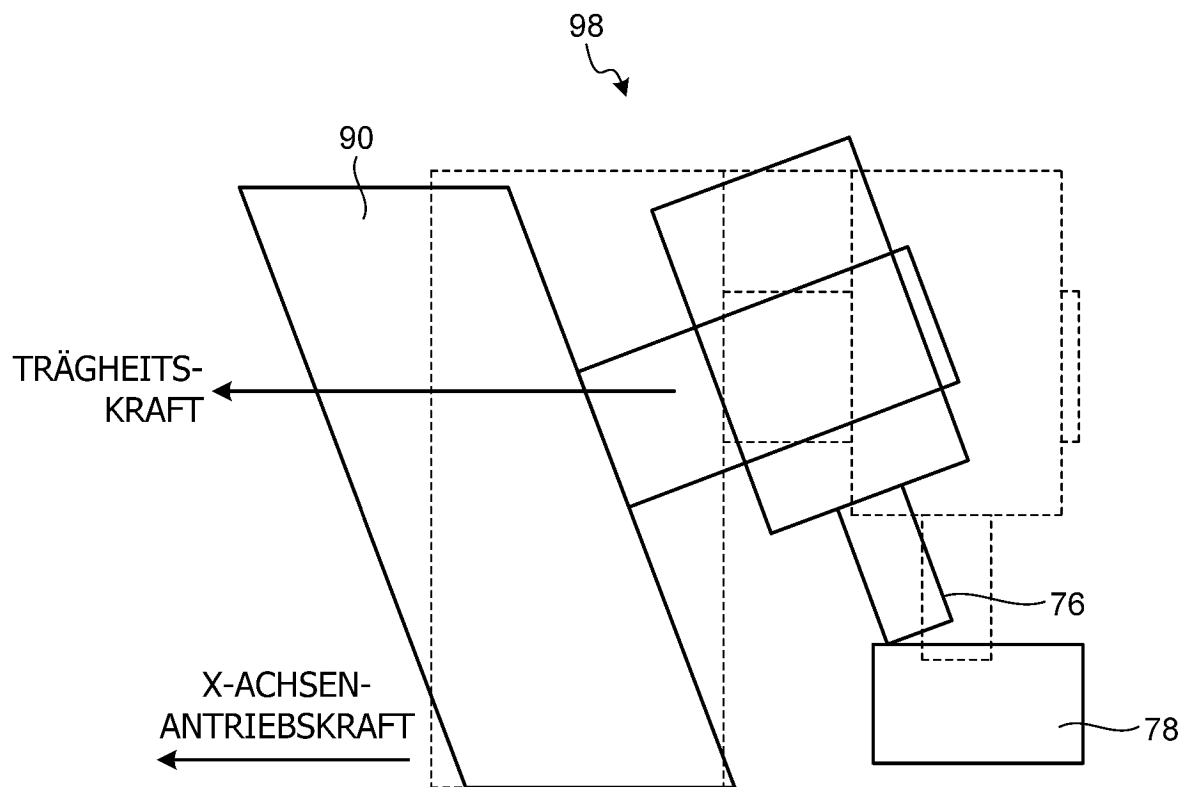


FIG.13

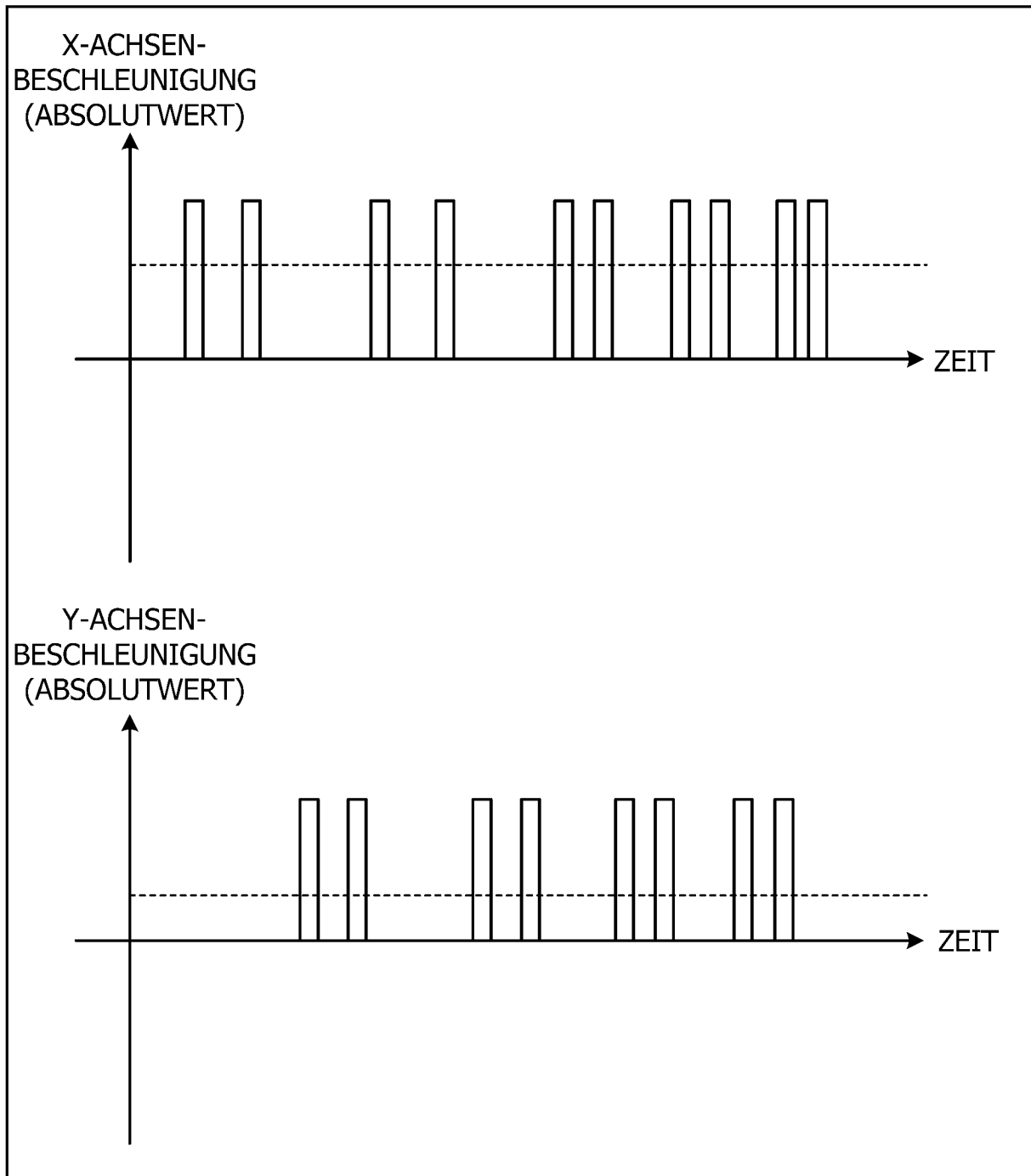


FIG.14

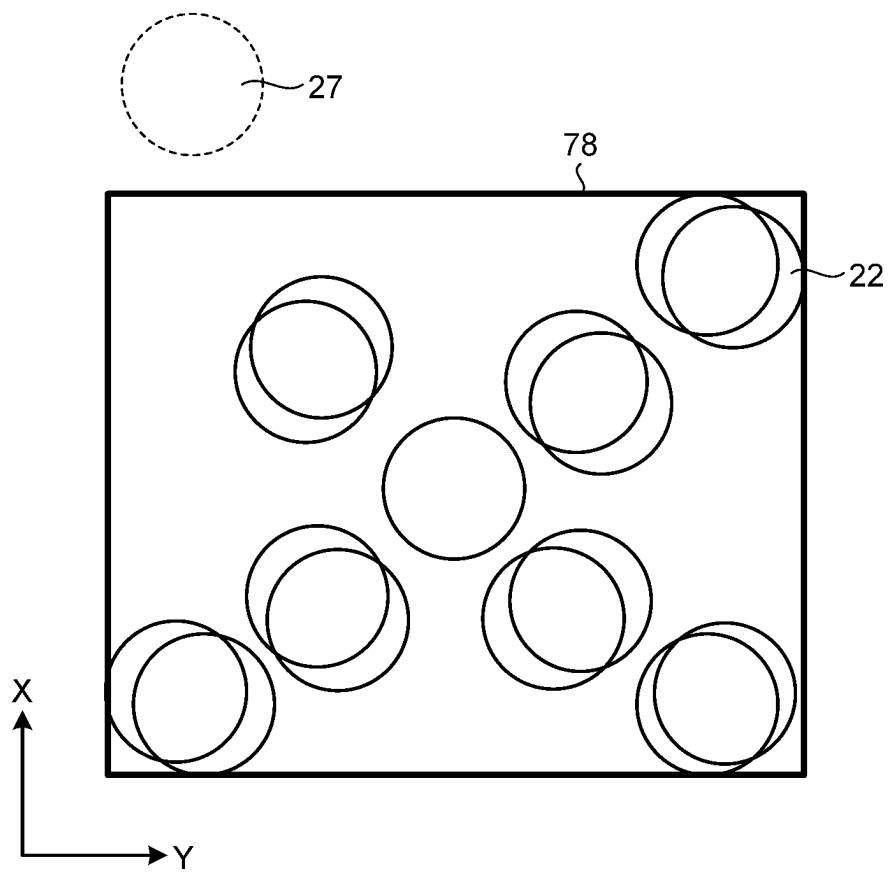


FIG.15

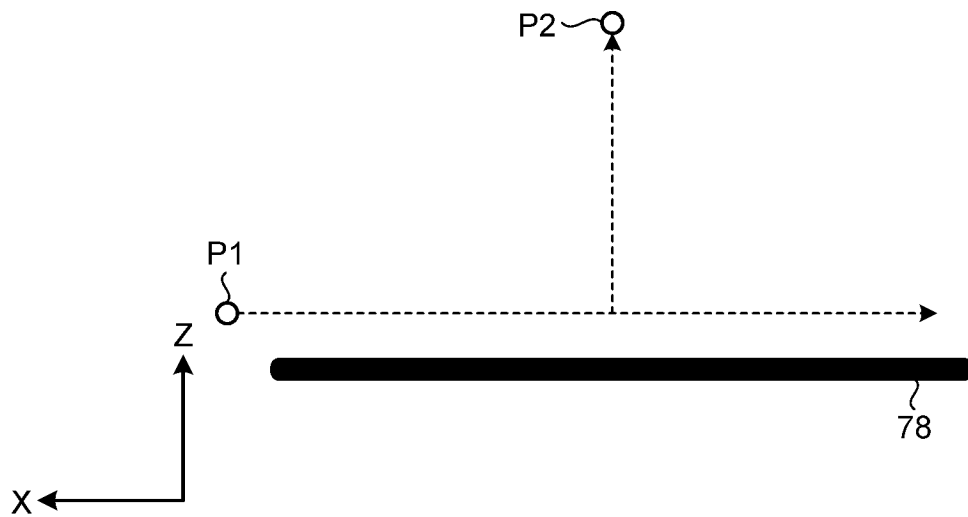


FIG.16

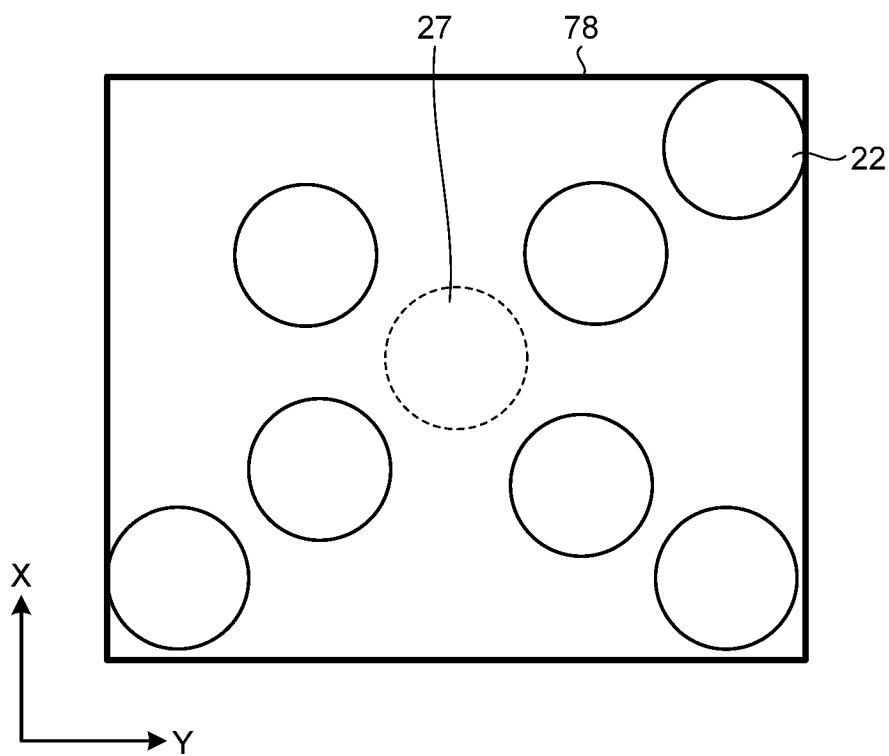


FIG.17

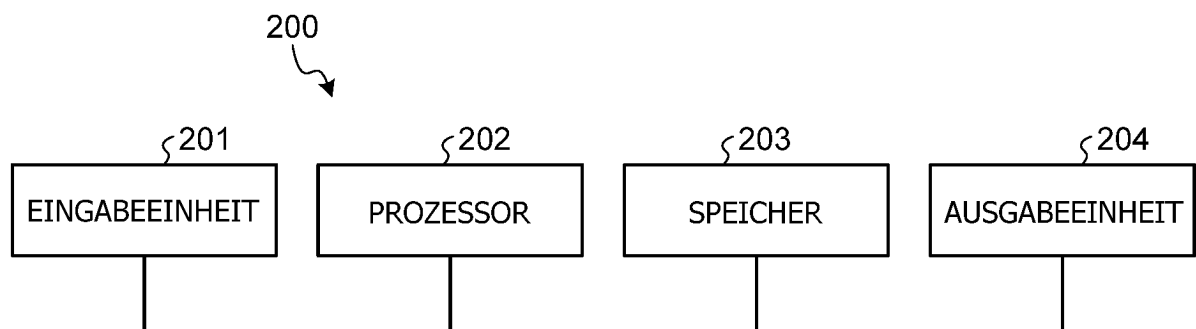


FIG.18

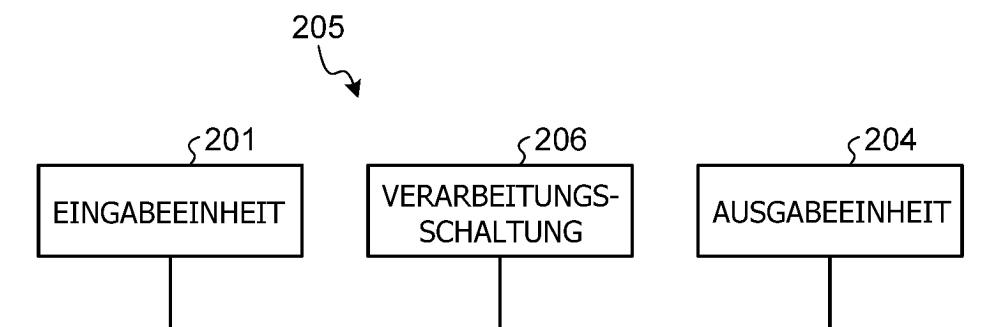


FIG.19

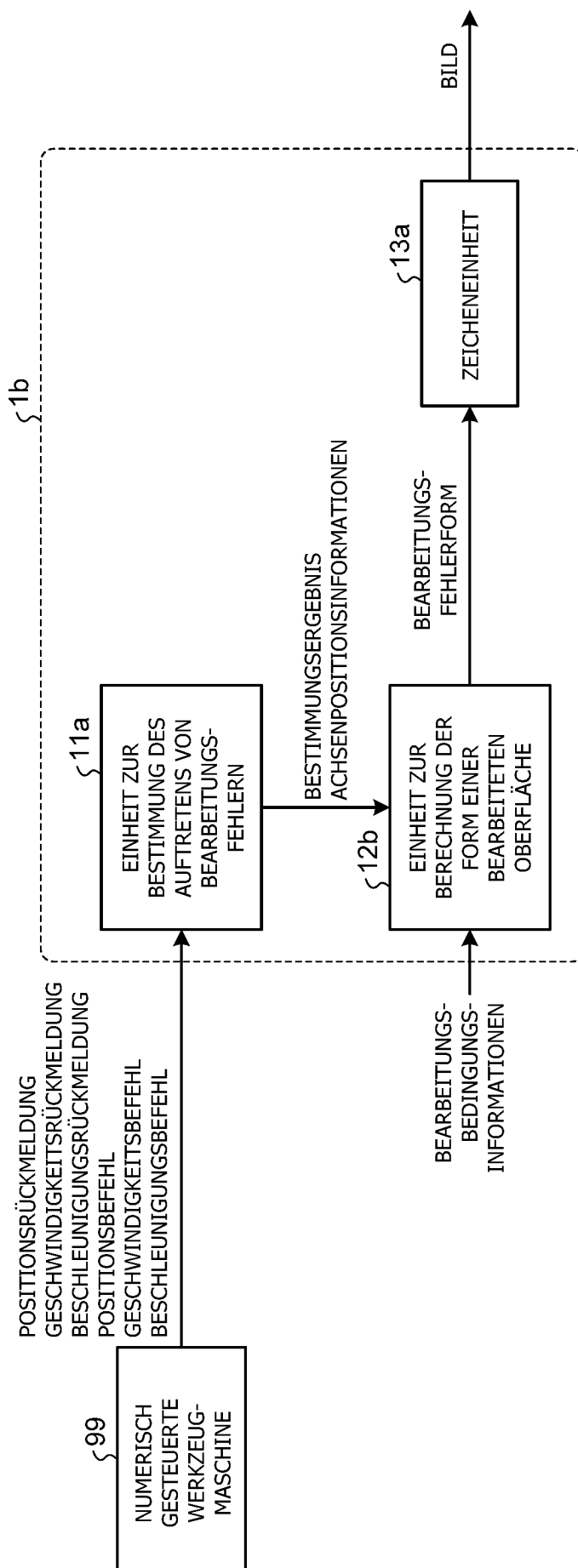


FIG.20

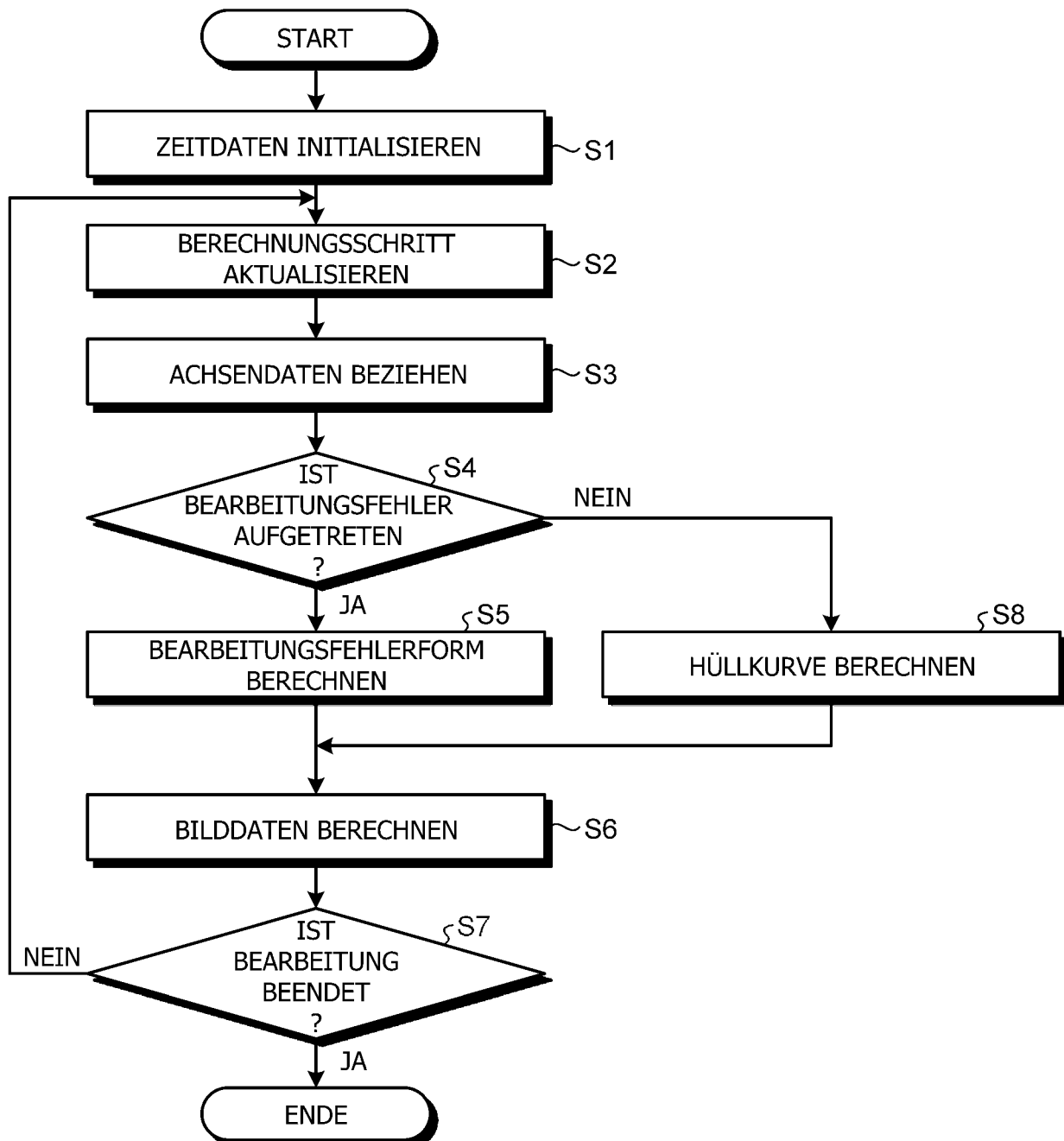


FIG.21

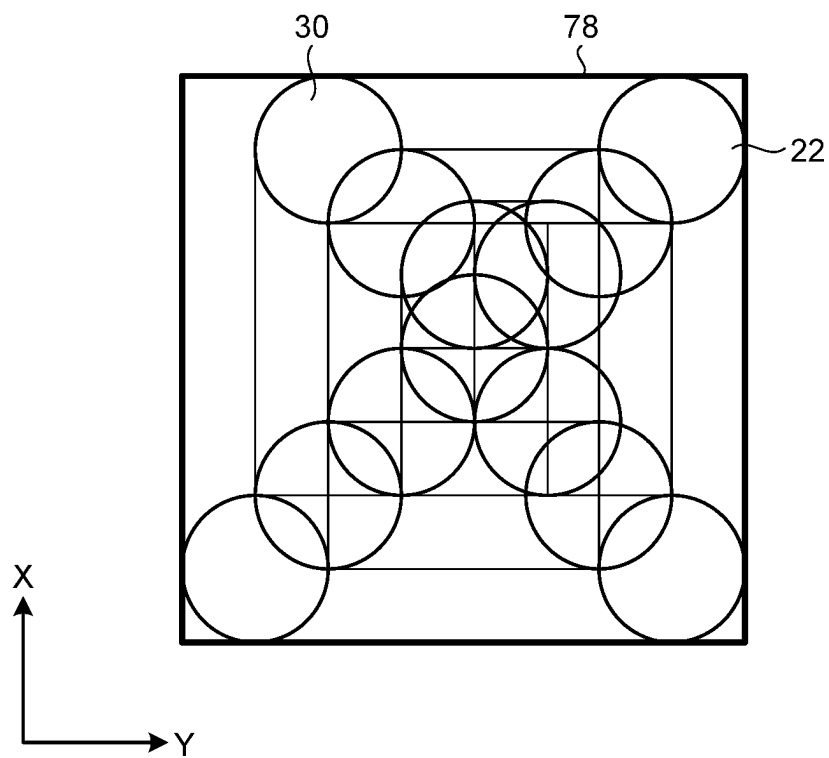


FIG.22

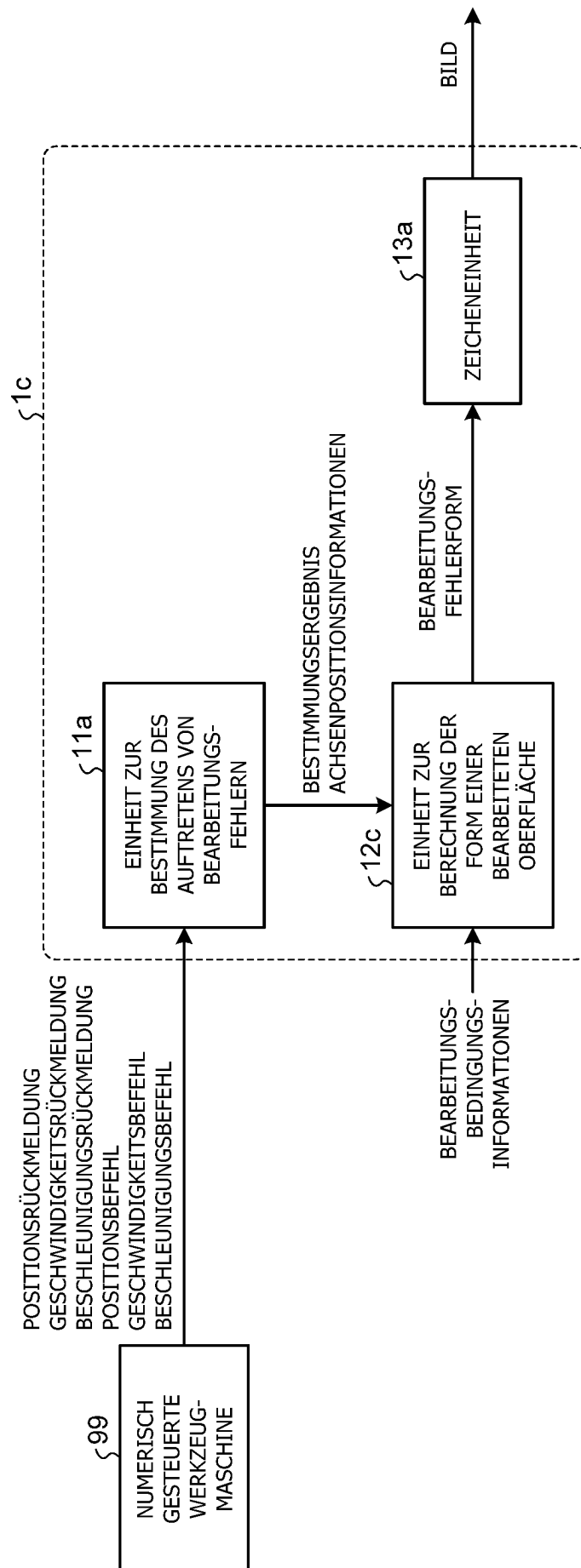


FIG.23

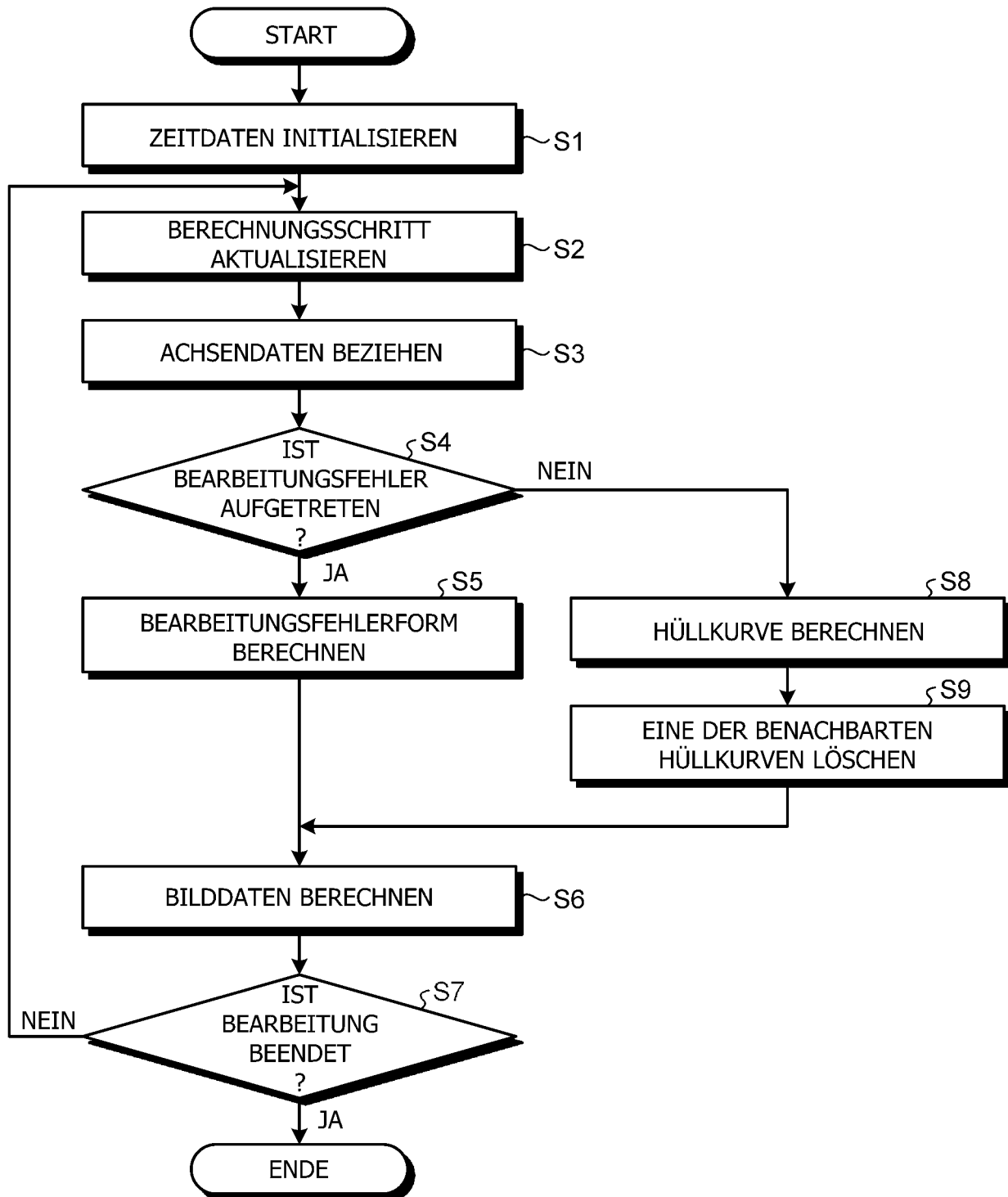


FIG.24

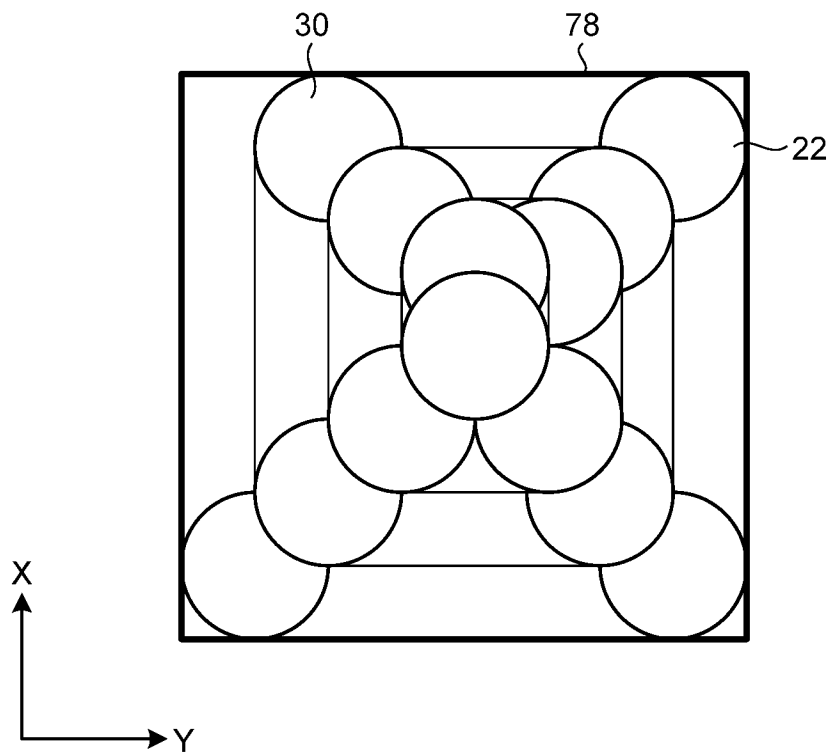


FIG.25

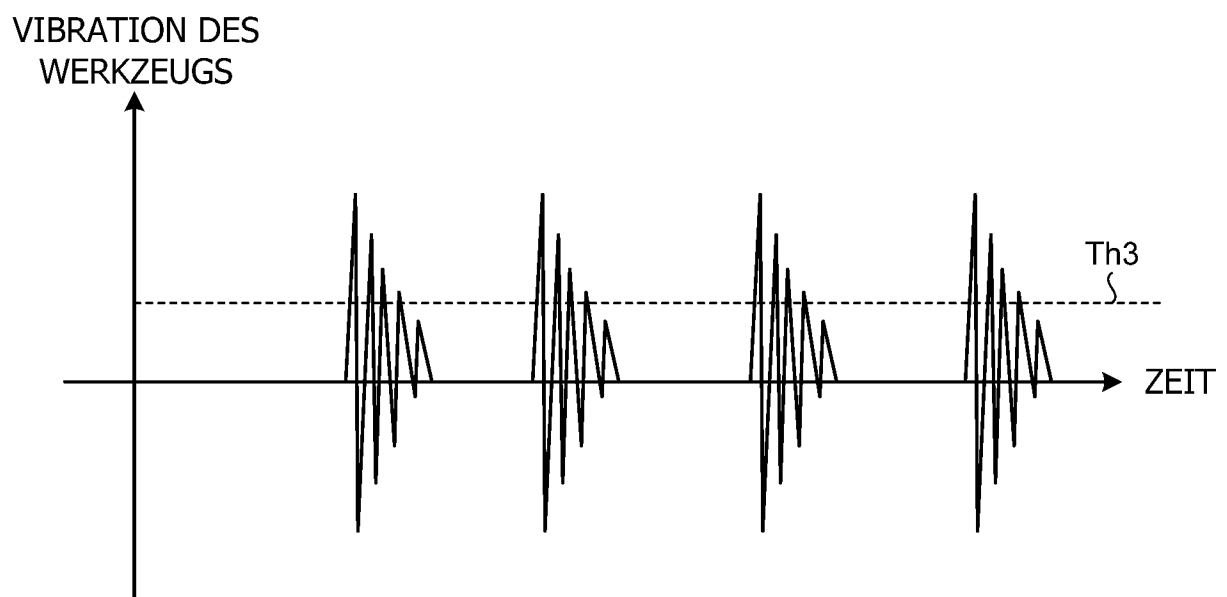


FIG.26

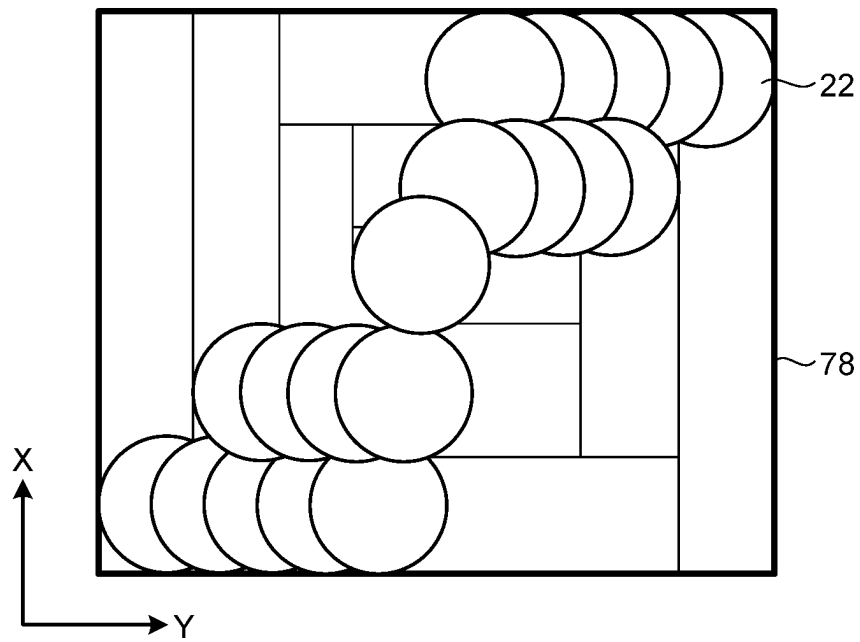


FIG.27

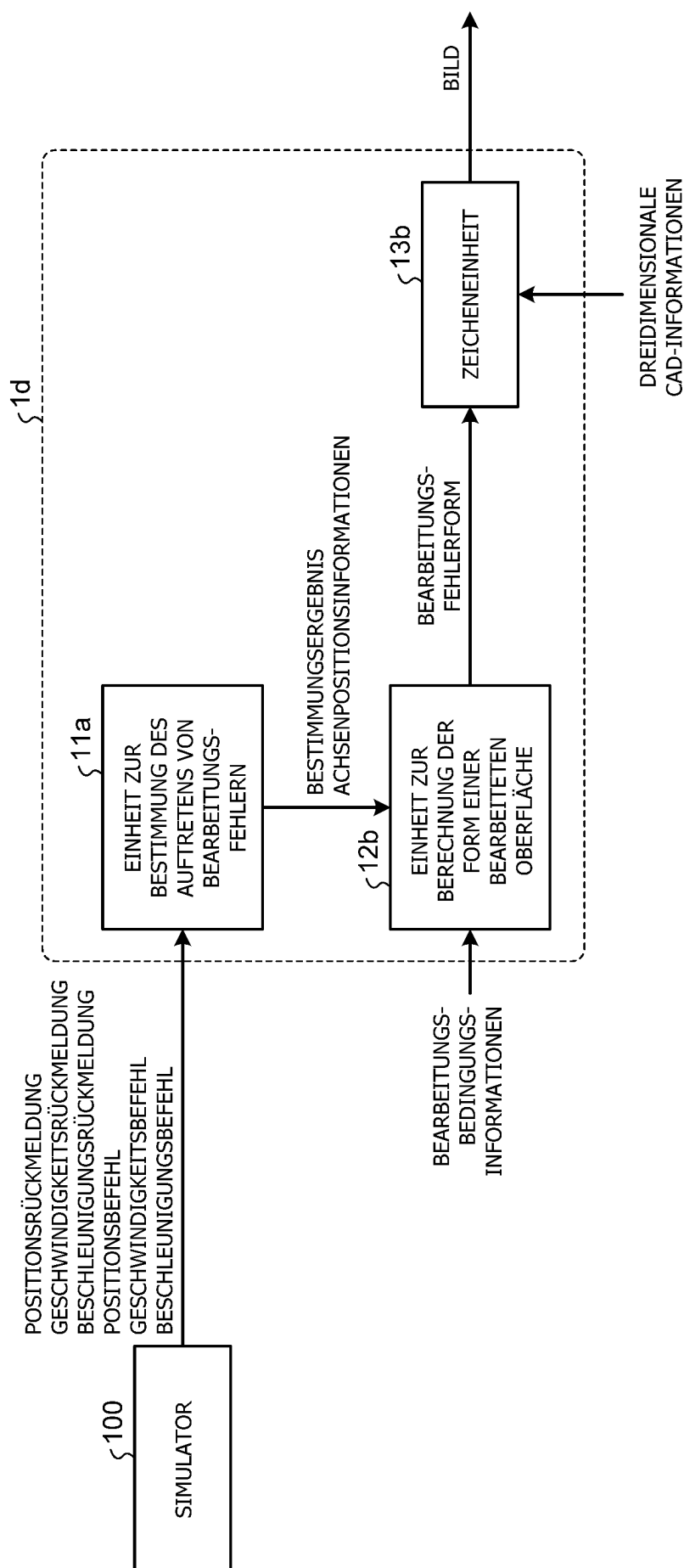


FIG.28

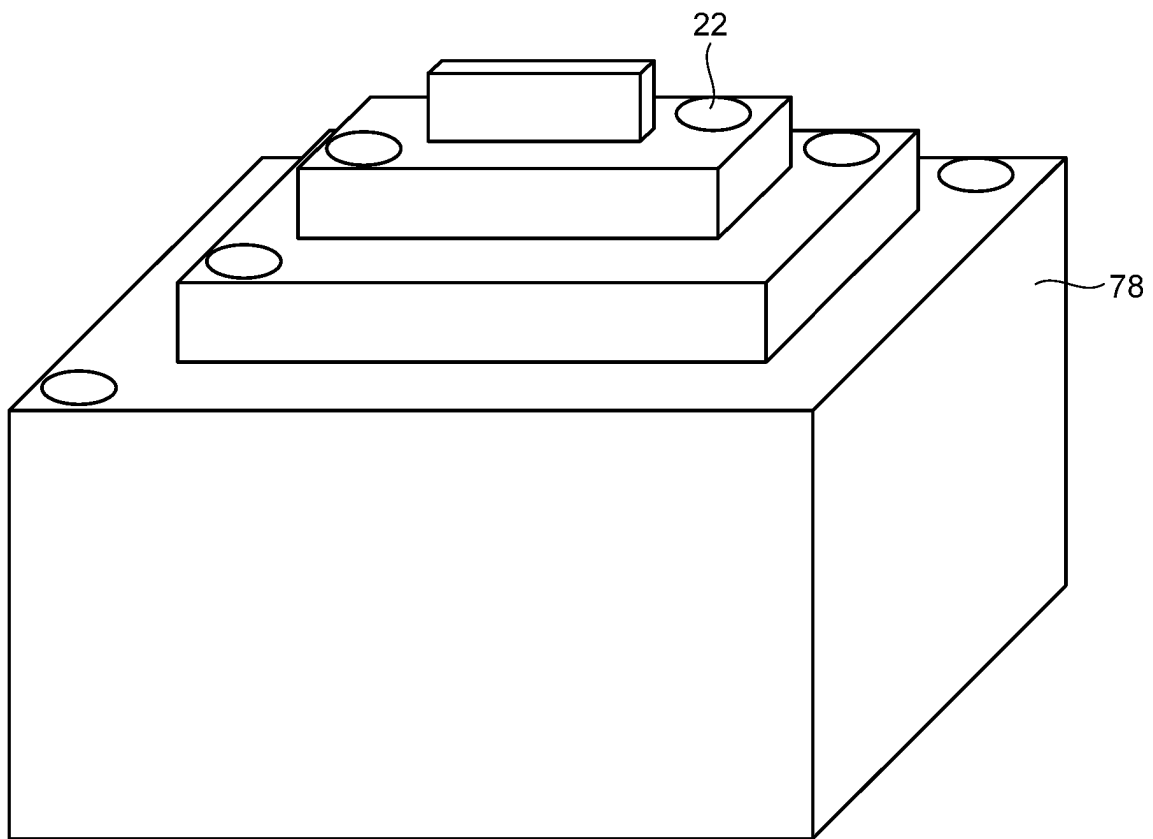


FIG.29

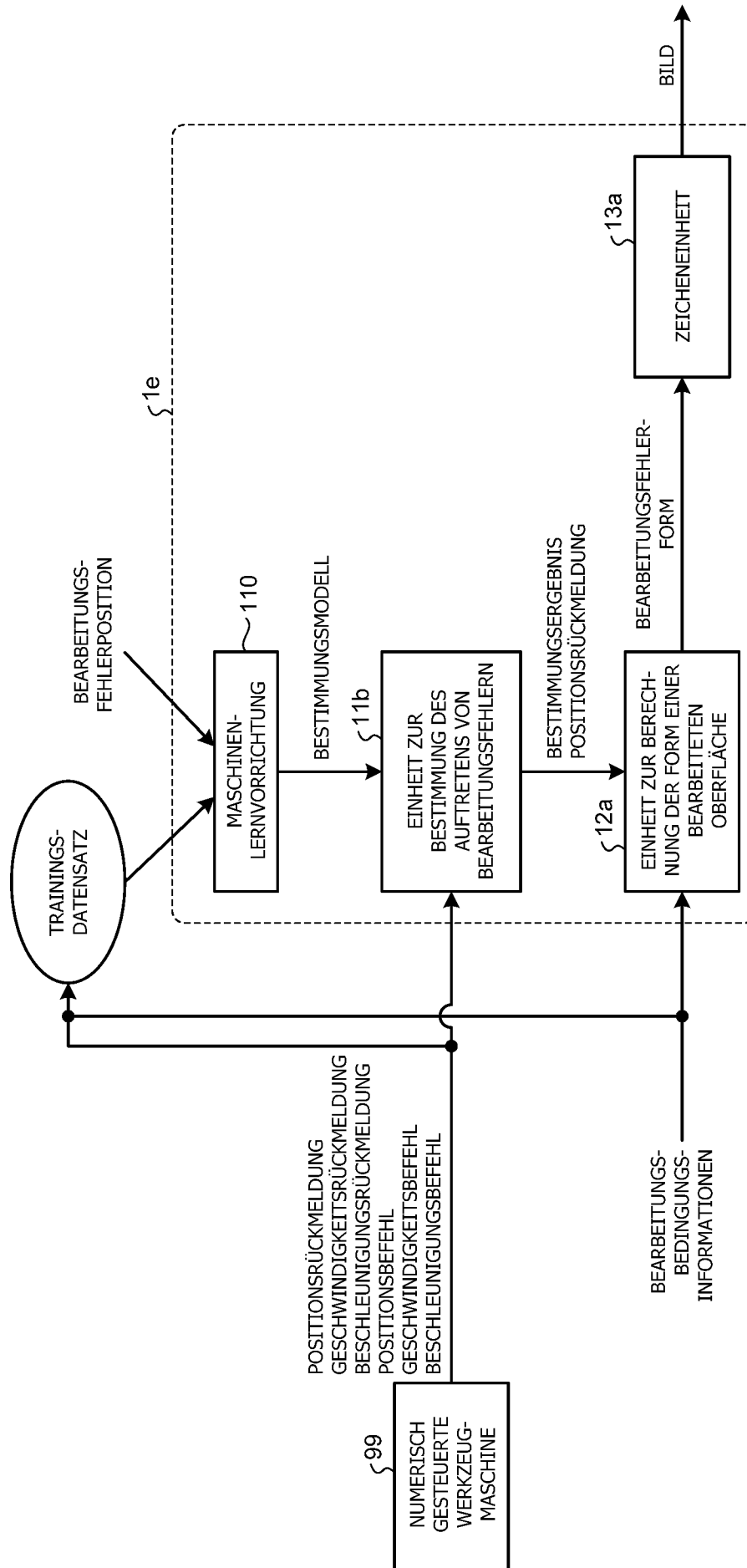


FIG.30

