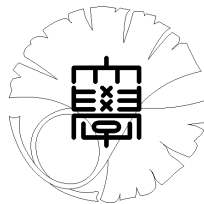


数理科学実践研究レター 2023-4 March 30, 2023

Peg-in-the-hole における効率的な手法の提案

by

奥田 花也



UNIVERSITY OF TOKYO

GRADUATE SCHOOL OF MATHEMATICAL SCIENCES

KOMABA, TOKYO, JAPAN

Peg-in-the-hole における効率的な手法の提案

奥田花也¹ (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

Hanaya Okuda (Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

概要

工業製品の組立過程において欠かせない、穴 (hole) に棒 (peg) を挿入する peg-in-the-hole と呼ばれる作業は、力制御に頼る人手では感覚的にできるものの、位置制御に頼る産業用ロボットでは、製品や把持部における不確実性から困難なものであった。本研究では peg と hole の相対的な位置関係が約 10 回以下の接触動作によって決定できる手法を提案し、peg-in-the-hole 作業の効率化を目指す。

1 はじめに

Peg-in-the-hole とは、機械部品の組立作業やネジの挿入作業などに見られる、穴 (hole) に棒 (peg) を挿入する作業のことである。このような作業を人間は手先の感覚で簡単に行うことができるが、工業製品の作成過程において人手で peg-in-the-hole を実施するには時間および金銭的成本が大きく、機械装置やロボットによって行われることが工業的には望ましい。しかし peg および hole の形状精度や機械装置による peg と hole の把持位置および把持角度の精度等が十分でない場合に、うまく peg が hole に入らず、挿入作業の途中でスタックしてしまうケースがあり、工業的に問題となる。現状では力覚センサーを使ったり、peg を傾けつつ hole の内壁に沿わせて差し込んだり、peg を回転させながら hole にうまく入る位置を探索することが主流である。しかし、このような手法では peg と hole の適切な位置関係を探索するために時間がかかったり、その過程で、ロボットハンドや機械部品を破壊してしまうことが多発するため、組立作業のボトルネックとなっている。そのため、工業的には peg と hole の位置関係や接触状態を効率的に推定する方法が求められている。そこで本研究では peg の保持位置および少ない回数での探索動作により、peg と hole の間の相対的な位置関係を推定し、挿入作業を行うための適切な位置を決定する手法を提案する。

2 問題設定

2.1 状況

本研究では hole の直径を R の円柱状の穴とし、peg は長さ L 、直径 $r (< R)$ の円柱とする。また peg は ψ 方向に θ だけ傾いているものとする (図 1)。ここで hole は垂直に形成されているものとするが、実際には θ は peg と hole の軸の傾きの差を表している。簡単のため、 θ は十分小さいとし、 $\sin \theta = \theta, \cos \theta = \tan \theta = 1$ と近似できるとする。探索動作開始前に装置が把持している peg の頂点座標は $(x, y) = (0, 0)$ 、hole を構成する円の中心の位置を $(x, y) = (x_h, y_h)$ とする (図 1)。上記のパラメータのうち、 R, L, r は既知媒介変数、 ψ, θ, x_h, y_h は未知媒介変数である。本研究で目的とする peg と hole の間の相対的な位置関係の推定では、 (x, y) 平面上で peg を把持したまま hole の内壁に複数回接触させることにより、未知媒介変数である ψ, θ, x_h, y_h を推定し、peg が hole の中心に傾きなく挿入可能な位置に移動するための位置情報を決定することを試みる。

2.2 問題解決の方向性

Peg の傾きに関するパラメータ ψ および θ を推定するためには、peg 上の 2 つの高さにおける軸の位置のズレがわかれば良い。そこで peg を hole の中に z だけ挿入した状態を考える (図 1a)。この時、上から peg と hole を見ると図 1b のようになる。本研究では $\theta \ll 1$ を仮定しているので、peg の断面は直径 r の円に近似される。Peg が hole の中に入るためには、peg の底面における断面の円

¹okuda@aori.u-tokyo.ac.jp

(図 1b の赤円) と高さ z のにおける peg の断面の円 (図 1b の青円) がともに hole の直径 R の円の内側に入っていれば良い。

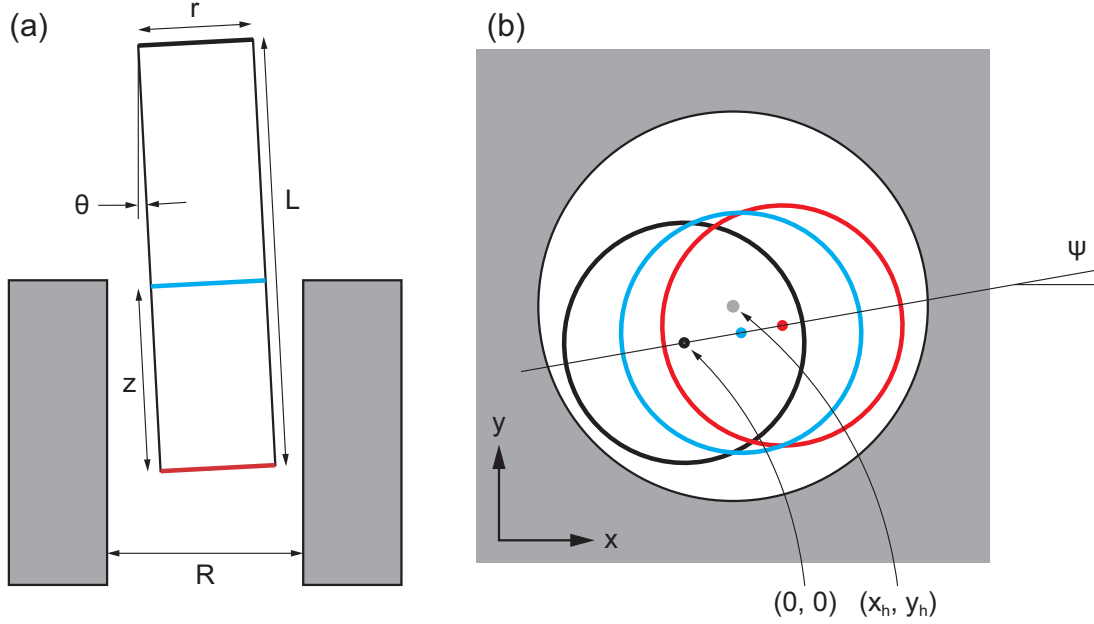


図 1: Peg と hole の位置関係。(a) Peg の最大傾き方向より、(b) hole 上部より見た図。灰色部が hole の外部を表す。

この状態において、peg の持ち手 (初期位置 $(x, y) = (0, 0)$) が取りうる領域を考える。Peg の断面の円 (直径 r) が hole の円 (直径 R) の中に収まるような持ち手の位置は、直径 $(R - r)$ の円の内側に位置し、上記に示した peg 中の 2 つの高さ (底面と z) に対応する直径 $(R - r)$ の円はそれぞれ図 2 の赤円 (peg の底面に対して、中心 (x_b, y_b)) および青円 (peg 中の高さ z に対して、中心 (x_z, y_z)) で示される。これらの円を構成する中心 2 点の距離は $z\theta$ となり、二点を繋ぐ直線は peg の傾いている方向 ψ を表す。よって、

$$\theta = \frac{\sqrt{(x_b - x_z)^2 + (y_b - y_z)^2}}{z} \quad (1)$$

$$\psi = \arctan \left(\frac{y_z - y_b}{x_z - x_b} \right) \quad (2)$$

で与えられる。またこの直線は hole の中心を通過し、peg の底面に対する直径 $(R - r)$ の円 (図 2 赤円) の中心から $L\theta$ だけ離れた位置に hole の中心が存在する。すなわち x_h, y_h は

$$\begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_b + L\theta \cos \psi \\ y_b + L\theta \sin \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_z + (L - z)\theta \cos \psi \\ y_z + (L - z)\theta \sin \psi \end{pmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。

最終的に、peg と hole の位置関係を示す 4 つの未知媒介変数である ψ, θ, x_h, y_h を知るためには、持ち手の取りうる領域を示す、直径 $(R - r)$ の 2 つの円の中心 (x_b, y_b) と (x_z, y_z) を、peg を hole の内壁に複数回接触させることで明らかにするという問題に帰着される。

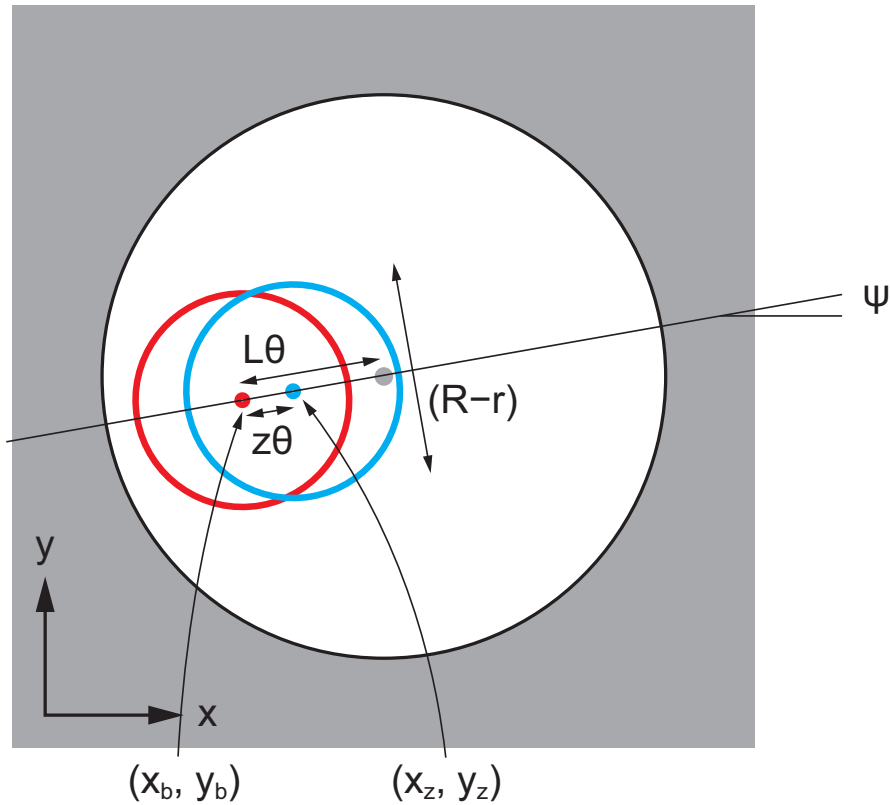


図 2: 持ち手の取りうる領域を表す 2 つの円。2 つの円の中心の相対的位置関係から未知媒介変数が導かれる。

3 接触動作

3.1 最低接触回数

Peg を hole の内壁に接触させると、その接触点は上記の 2 つの直径 $(R - r)$ の円のどちらかの円周上に位置する。直径既知の円の中心を導くためには円周上から最低 2 点の座標がわかれば良い。そのため、問題解決のための探索動作としては、peg を hole の中で動かしながら、2 つの円周上の接触点をそれぞれの円に対し 2 点以上探さなければならない。隣あう 2 点の接触点は同じ円周上に乗る可能性が高いため、偏角方向 ψ に対して隣あう 2 点のペアが同じ円周上に乗るとしてその円の中心を求めることを考える。しかしながら、2 つの中心がずれた円が存在する場合、隣あう 2 点のペアが異なる円周上に乗る、もしくはすべての接触点と同じ円周上に乗るといった状況のいずれかが必ず発生する。後者の場合は後述する。前者の状況はすなわち 2 つの円周上にそれぞれ接触点が 3 点以上ないと、それぞれの円の中心位置を決定できないことを示している。よって peg は hole の内壁に最低で 6 回接触する必要がある。

3.2 接触動作のセット数

前節において考えた最低 6 回の接触回数は、2 つの円の中心を決定するための必要条件ではない。なぜなら接触点 6 点のうち、片方の円周上に 4 点以上乗ってしまう可能性もあり (図 3 の例)、この場合にもう片方の円が決定できなくなるからである。なお前節において記述した「すべての接触点と同じ円周上に乗るといった状況」はここに含まれる。しかし最低接触回数が 6 回であれば、少なくとも 1 つの円周上には 3 点以上の接触点がかかることになるので、2 つの円のうち片方は決定されることになる。よって、片方の円が決定された後に再度 peg と hole の接触動作を行うことでもう片方の円も

決定されるであろう。2セット目の接触動作は決定「されなかった」円の円周上に属する接触点の近傍で行われることによって、6回より少ない接触回数で決定「されなかった」円を決定できると想定される。最終的には多くとも約10回程度の接触回数で2つの円の中心は決定されるものと期待できる。2つの円が決定されれば式1-3を用いて、pegとholeの相対的な傾き (ψ, θ) および相対的な位置 (x_h, y_h) を求めることができ、pegをholeの中心に移動させ挿入動作を始めることが可能となる。

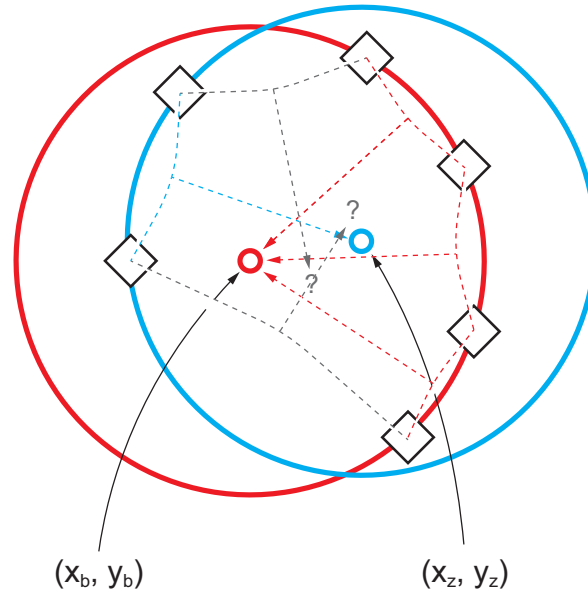


図 3: 6 点の接触点の例。隣り合う接触点のペアから円の中心を推定する。同一円周上に 3 点以上乗れば (ここでは赤円)、円の中心は決定される。一方 2 点以下の場合求めたい (x_z, y_z) は一意には定まらない。

4 終わりに

本研究では peg と hole の相対的な位置関係が約 10 回以下の接触動作によって決定できる可能性を持つ手法を提案した。本手法は、従来行われてきた力覚センサーを用いた探索動作に比べて、少ない回数の接触動作のみで peg と hole の相対的な位置関係を決定可能である。本手法の最大のメリットは力覚センサーによる接触時にかかる力の大きさや向きの情報が必要でなく、単に接触したことのみが検知できれば良いことにある。一方で本手法が可能性を持つと表現した理由は、作業が機械装置の位置制御の精度に大きく依存し、特に hole の直径 R と peg の直径 r が近い場合、前節で考えた 2 つの円は非常に小さくなる。また peg が hole にそもそも入らないケースも想定されるので、別途そのような場合の動作も検討が必要であるからである。最後に、本研究課題を提供してくださった FA・ロボットシステムインテグレータ協会、議論をしてくださった佐藤知正先生 (東大名誉教授)、高山義弘様 (ロボット SIER 協会付き インテグレスター株式会社)、矢野良輔先生 (東京海上ディール株式会社)、今野北斗先生 (東大数理)、儀我美一先生 (東大数理)、奥田伸樹さん (東大数理) に感謝します。