5G−4

並列組立における誤差の打消しとその利用*

前田 薫† 國井 利泰†
東京大学理学部情報科学科‡

1 はじめに

機械による自動組立は工業生産の各局面で実用化されつつある。組立工程における組立誤差は部品の工作精度、および部品を組み合わせる際の作業精度に起因する。部品の工作精度は設計段階で tolerance(許容誤差) として指定される [1]。通常、複合部品の誤差はそれを構成する部品の誤差の累積 (cumulative tolerance) として静的に評価される。

設計段階では累積誤差は worst-case として評価される場合が多い。評価した累積誤差が大きくなりすぎる部品は設計の段階で検出され、設計し直される。多くの場合には tolerance をより厳しいものとすることとなる。一方実際の組立では誤差の打ち消しが起こるために、worst-case の評価と比べて組立が楽な場合が多い。

本論文では、並列な組立をすると逐次的な組立に比べて誤差の累積が少ない場合について考察する。組立工程の設計において並列な組立を考慮することができれば、誤差の設定が worst-case の場合に比べて有利になる。並列な組立をする場合、組立機械が複数必要であるかまたは工程数が増加することによりコストが高くなる一方、部品工作のコストを下げることができる。合計のコストはどちらが高いかは応用、場合によるが、ここにトレードオフを設定することができる。

2 例

次の二つの例を考える。

例 1: ねじ止め

二枚の板をねじで固定する場合、ねじを一つずつ締めてゆくと後へ行くほどねじが入れにくくなり、場合によっては全くねじが入らなくなってしまう。このような場合でも、一度ねじをねじ穴に通しておいてから全てのねじを同時に締めてゆくとねじ止めを完了できることが多い。同時に締めるかわりに、ねじを締める際に完全には締めないでおいて全てのねじを少し締め、また最初のねじから締め付け付業をくり返すことでも同様の結果に到達することができる。この工程は「かしめ」として知られている (図 1)。

例 2: 本棚と百科辞典

何冊かの百科辞典を本棚に並べる場合、一冊ずつ並べてゆくと最後の一冊が入り切らないことがある。このような場合でも本を本棚からはみ出すように扇形に並べておいて、中央をおしてゆくと入ることがある (図 2)。

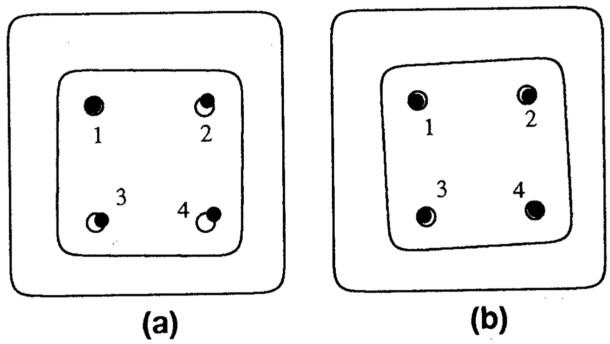

図 1: かしめ
(a) ではねじ 1 を締めたため他のねじが入らない。
(b) ではねじ 1–4 を同時に締めたため止まる。

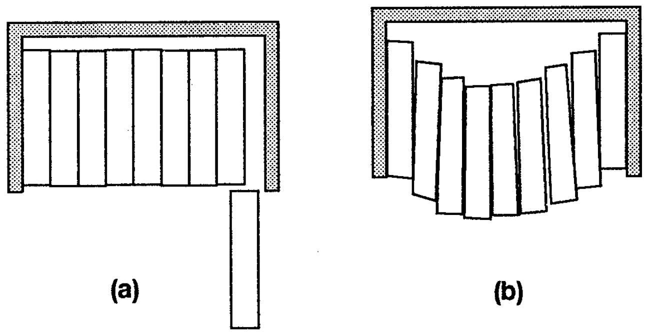

図 2: 本棚と百科辞典
(a) では一冊入り切らない。
(b) のようにすると入る。

これらの例では逐次的な組み立てをすると誤差の打消しが十分でなかったために累積誤差が誤差の許容範囲を超え、組立不能になってしまった。部品ごとの許容誤差の worst-case 解析によればこのような場合を組立不能としてあらかじめ取りのぞくことができる。

しかし並列な組立を行なえば worst-case 解析では不合格になるはずのものも組み上がる場合がある。これは何が原因なのだろうか。

3 誤差打消しのモデル

一つの組立工程において複数の部品を固定する必要のある場合、部品を一つずつ順に処理する方法が考えられ

*Utilizing Error Cancellation in Parallel Assembly
†Kaoru MAEDA, Tosiyasu L. KUNII
‡Department of Information Science, The University of Tokyo

る。これは部品を一つ固定することにより、処理すべき問題の規模を縮小していると考えられる。

一般には規模が小さくなるほど問題は解決しやすい。しかし誤差の打消しを考える場合には逆のことが起こる。多くの誤差を合成したほうが打消し合った結果は誤差の平均値、つまり0に近づくからである。

誤差とその打消しがどのようにして起こるのか、ここでは最も簡単なモデルに従って考えてみよう。

例として同じ大きさの6つの部品を並べて固定する組立問題を考える。6つの部品は設計指定サイズ a よりある等しい長さ d だけ大きい状態 (+)、小さい状態 (−)、指定通りである状態 (0) の +, −, 0 の三つの状態どれかに工作されているとする。つまり部品の工作誤差を +, −, 0 の三通りでモデル化したことになる。完成した製品は6つの部品を並べてその長さが $6a$ であるとき、つまり最終的な誤差が0である場合に組立可能であるとする。また、組立誤差はここでは考慮しない。

6つの部品の誤差が互いに打ち消し合って組立可能となるのは、6つの誤差のとりうる組合せ $3^6 = 729$ 通りのうち、誤差の単純合計が0となる141通りである。

今6つの部品のうちの一つだけをその右端がちょうど指定された位置に合うように固定したとする。すると残りの5つの部品は二つの空間にそれぞれ固定されなければならない。これは一つの問題を二つの独立な問題に分割したことに相当する。これらの部分問題の両方が組立可能な場合にのみ全体として組立可能である。

このモデルで、全ての部品を同時に組み立てた場合に組立可能な部品の誤差の141通りの組合せに対して、これらを二つの部分問題に分割することを考える。1-5, 2-4, 3-3 の三通りの分割に対し、組立可能である場合の計算機によるシミュレーションの結果を表1に示す。

分割の方法	0-6	1-5	2-4	3-3
組立可能な場合	141	51	57	49

表 1: 問題の分割と組立可能性

この表から、部分問題の規模が小さくなるほど組立可能性が低くなることがわかる。2-4 の分割が 1-5 の分割より良い結果を示しているのは、偶数個の部品の組立が有利であるこのモデルの性質を反映したものと考えることができる。

4 問題分割の回避

前節で問題の縮小によりと誤差の打消しが期待できなくなる場合を見た。ここでは問題の縮小がどのように発生したかについて考える。

部品の組立とは二つ以上の部品の相対的位置関係を固定することにほかならない。組み立てられるべき二つの部品 A, B が固定されないうちには、それらの部品と接する他の部品 C, D との位置関係を調節することが可能である (図 3)。この場合には、部品 C, D 間で誤差の打消しがあり得る。

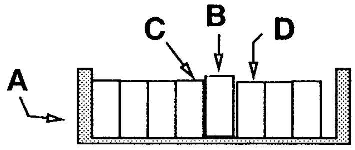

図 3: 固定による制限

しかし部品 B が A に固定されてしまうと、部品 C, D は B に衝突してしまうために位置が制限されてしまう。ここに B という障害物によって C, D は独立な空間へ分割されたことがわかる。

逐次的な組立を行なうと、一度に一つの部品の固定しかできないため、その作業が終了した時点で問題の縮小が起こる。第2節の例1では一本のねじ止めによる固定が残り三本のねじ止めというより小さい問題へと帰着された。例2では本と本棚の間の摩擦によって本と本棚とが固定されている。図2が組立可能であったのは、この固定力が比較的小さかったからである。

しかしながら部品固定は必ずしも二値的なものではなく、固定開始 (完全に自由な状態) から固定完了 (自由がない場合) までに無限の中間的段階を含む場合が多い。その中間の段階では誤差の伝般が可能である。自由な状態と比べるとその調節力は小さいが、ここで誤差の打消しを期待することができる。例1にあった「かしめ」では組立作業の単位は逐次的であっても、固定の中間状態をうまく使うことで疑似的には並列な組立が実現できている。ただし、このために工程数が増加していることに注意が必要である。

工程数を増加させずに組立を行なうには、組立装置を複数用意しておくことにより組立を並列に行なえばよい。この場合には組立装置の数が増える分だけのコストがかかる。

5 まとめ

本論文では誤差の打消しによって可能な組立が逐次的組立では実現できないような場合を示し、例を通じてその原因を考察した。このような不都合は従来部品の精度を上げることで回避されてきた。組立そのものを並列、あるいは疑似並列に行なうと、この問題を解くことが可能な場合があることがわかった。部品精度の向上にかかるコストが並列な組立のコストより大きい場合には並列な組立によるメリットがあるはずである。どのような場合に並列な組立が有利であるか、そのトレードオフの設定は自明ではないが、本論文ではその可能性を示すことができた。

参考文献

[1] A. D. Fleming. A Representation for Geometrically Toleranced Parts. In *Geometric Reasoning*, pp. 142–167. Oxford Science Publications, 1989.