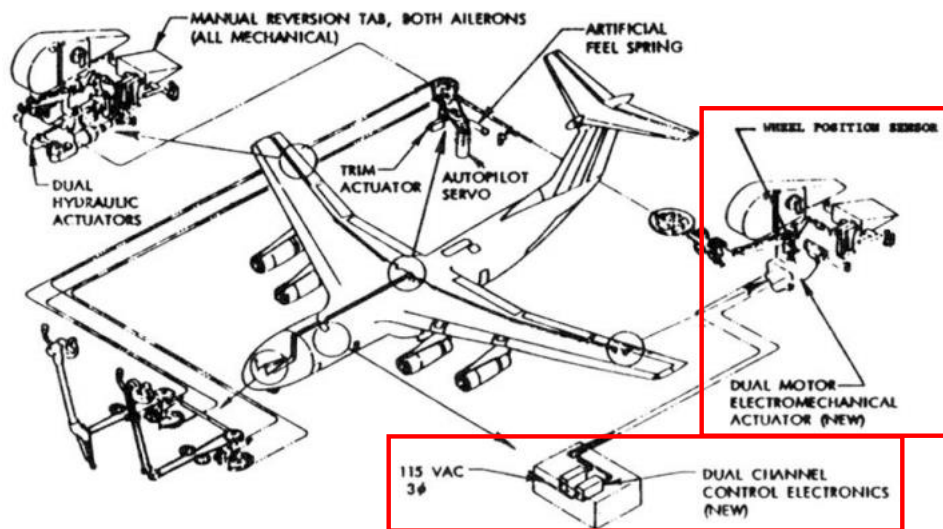


電動航空機における アクチュエータ技術

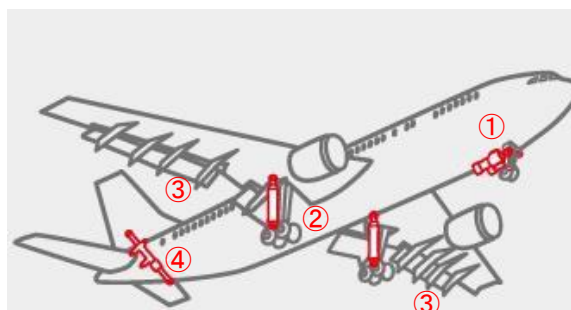
東京大学
大学院新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻
寺尾 悠

1-2. アクチュエータ電動化技術の黎明期



IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. AES-20, NO. 3 MAY 1984

1980年代に、軍用機においてElectromechanical Actuation System (EMAS)が検討
→ おそらくこれが最初の検討プロジェクト



<https://www.kyb.co.jp/products/aircraft.html>



今までの航空機:

- 主翼
- 尾翼の方向舵面動作
- 主脚格納
- テイルスキッド
- ブレーキ
- ステアリング etc...



ほぼすべての動作機構に
油圧を使用
→ 配管の複雑さや油漏れ
→ より簡易な構造に
→ **電動化**が検討

1-3. 電動アクチュエータプロジェクトの歴史

Project	EMAS	EPAD
Date	1985-1986	1990-1992
Aircraft and application	C-141/Aileron	F/A-18/Aileron
Flight test hours	12.5	25
Blocked force (kN)	84.7	53.65
No-load speed (mm/s)	118 (motor 9600 r/min)	214
Stroke (mm)	138	112.8
Output backlash (mm)	0.45	0.51
Mass (kg)	29.5	12.5
Bandwidth (Hz)	4	7



http://military.sakura.ne.jp/aircraft/3_c-141.htm

C-141



<http://eaglet.skr.jp/MILITARY/FA-18EF.htm>

F/A-18

EMAS: Electromechanical Actuation System

EPAD: Electrically Powered Actuation Design

- 電動アクチュエータは**軍用機**で検討されてきた
(上記以外にも複数検討されてきた)
- 主に検討されていた部位は**エルロン**

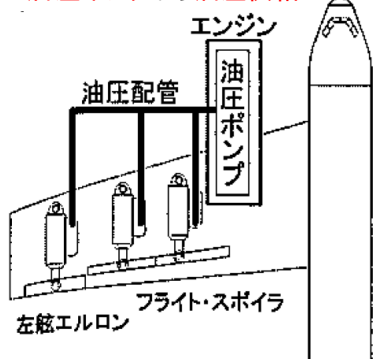
2-1. 油圧式と電気油圧/電気機械式の比較

従来機: HSA (hydraulic servo actuators)

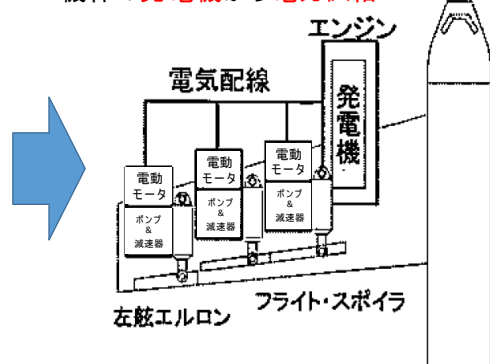
A380, F-35: EHA (Electro Hydrostatic Actuator)

B787: EMA (Electro Mechanical Actuator)

機体の油圧ポンプから油圧供給



機体の発電機から電力供給



大依仁, 日本航空宇宙学会誌, vol.63, No.2, pp. 38-40, 2015

現状の課題

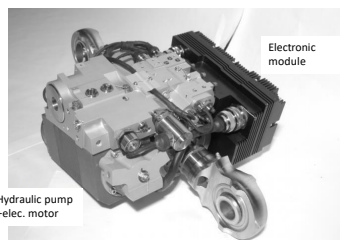
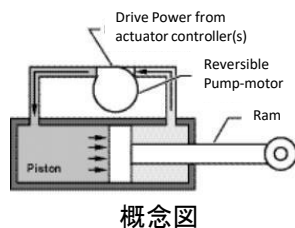
- 油圧ポンプや配管の重量が大
- 整備性が悪い
- 油漏れ発生

期待される効果

- 油圧ポンプや配管の削除
- EMA: 油圧レス、EHA: 油圧配管不要
→ 整備性向上

2-3. 電気油圧式アクチュエータ (EHA)

EHA (Electro Hydrostatic Actuator)

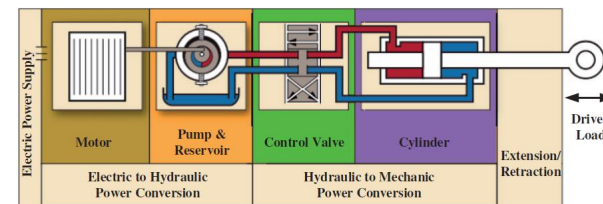


A380に使用されているEHA

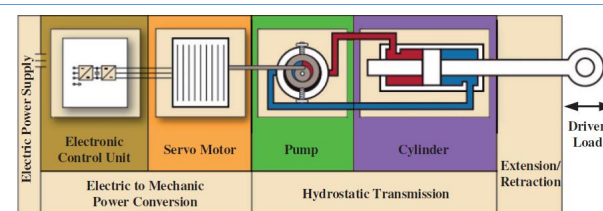
- アクチュエータに付随の電気モータが油圧ポンプを回して油圧を高め、アクチュエータを作動
- 油圧系コンポーネント(アクチュエータ、アキュムレータ、制御バルブ)とモータが組み合わさった構造
- A380に使用されている(左図)

2-2. アクチュエータ構成の比較

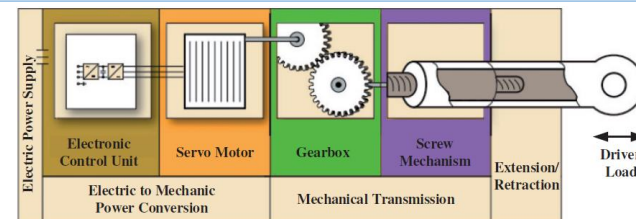
HSA
(従来機)



EHA
(A380, F-35)



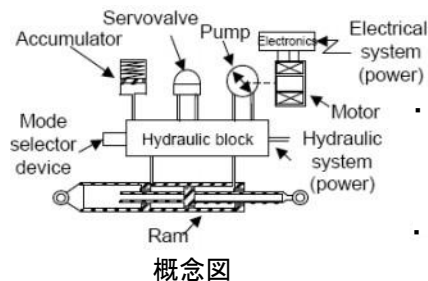
EMA
(B787)



G. Qiao, et al., *Journal of Mech. Engin. Sci.*, 4128-4151, 2018.

2-4. EHAの派生型アクチュエータ (EBHA)

EBHA (Electro Backup Hydrostatic Actuator)

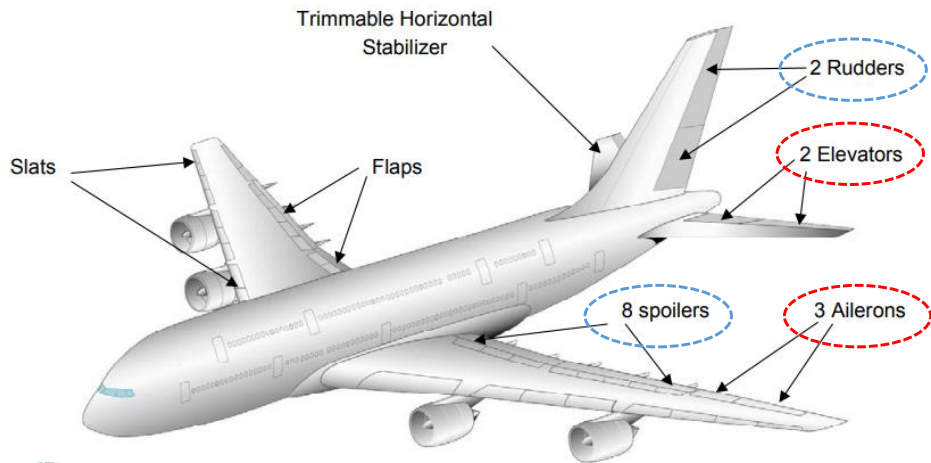


MOOG社のEBHA

- EHAの派生型装置として開発されているバックアップEHA
- 通常、図中のElectrical system部分は遮断され集中油圧系駆動
- 集中油圧系の故障時にモータが起動し必要な油圧を供給
- EHAよりサイズは大きくなる
- A380に搭載されている

2-5. EHA/EBHAの適用例

1. A380のフライトコントロール



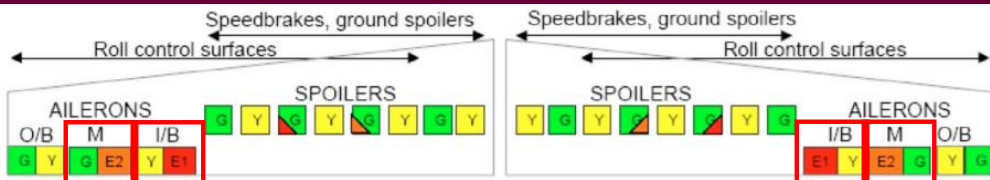
EBHAとHSA
EHAとHSA

油圧式 (HSA) とペアになっている

Van Den Bossche, D. (2006, September). The A380 flight control electrohydraulic actuators, achievements and lessons learnt. In *25th international congress of the aeronautical sciences* (pp. 1-8).

2-5. EHA/EBHAの適用例

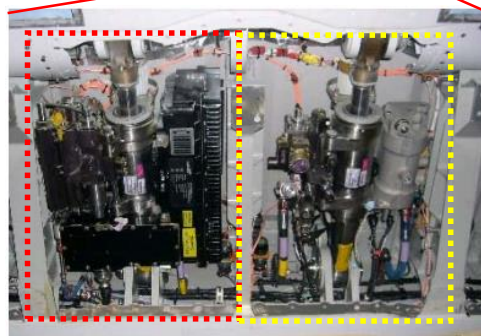
3. A380の翼の中に格納されたアクチュエータ



各パートには2つずつのアクチュエータが実装

→冗長性の確保 (GとY及びE1とE2)

→“2H2E” (2つの油圧とモータ)

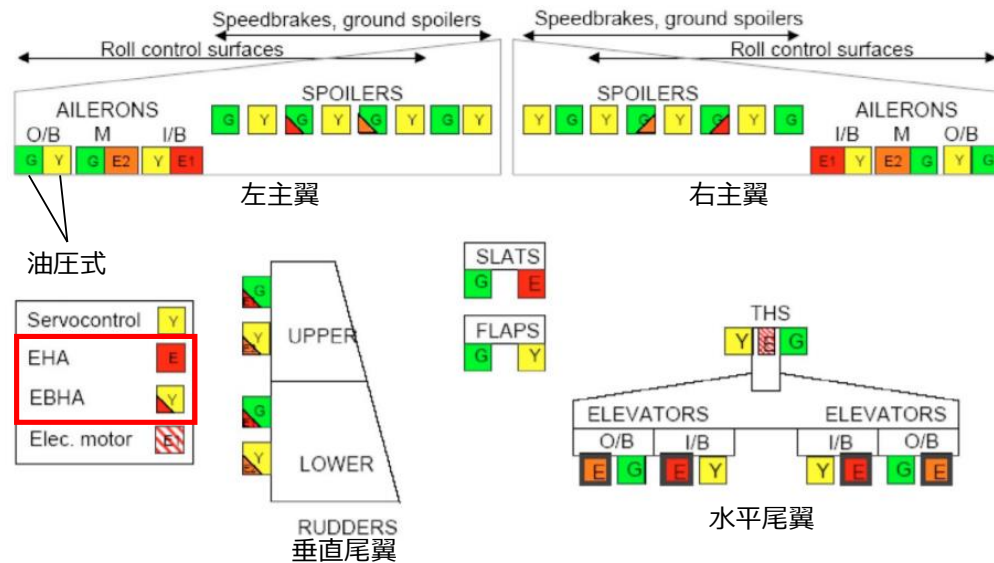


EHA(E1 or E2) HSA(Y or G)
翼内に格納された様子

Van Den Bossche, D. (2006, September). The A380 flight control electrohydraulic actuators, achievements and lessons learnt. In *25th international congress of the aeronautical sciences* (pp. 1-8).

2-5. EHA/EBHAの適用例

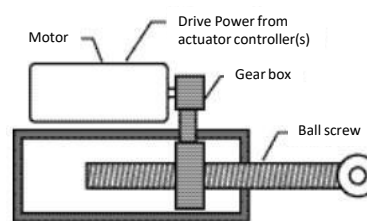
2. A380のフライトコントロールにおけるアクチュエータ配置



Van Den Bossche, D. (2006, September). The A380 flight control electrohydraulic actuators, achievements and lessons learnt. In *25th international congress of the aeronautical sciences* (pp. 1-8).

2-6. 電気機械式アクチュエータ (EMA)

EMA (Electro-Mechanical Actuator)



概念図



Parker社のEMA

Jensen, Stephen C., and Daniel Dawson. *Digital Avionics Systems Conference 2000. Proceedings. DASC. The 19th. Vol. 1.* IEEE, 2000.

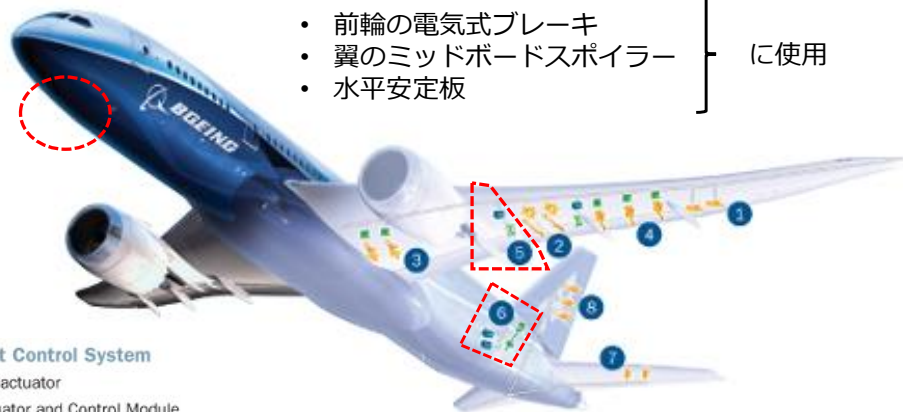
・モータで駆動され、モータの回転運動をアクチュエータの直線運動に変換する (ボールねじを使用)

・油圧系のコンポーネントを使用しない点でEHAやEBHAよりもコンパクトかつ軽量となる可能性

・エネルギー効率はEHAよりも高い (EMAは制御翼面の位置を変える時のみ作動)

2-7. EMAの適用例

1. B787におけるフライトコントロール部分とブレーキ



- 前輪の電気式ブレーキ
 - 翼のミッドボードスポイラー
 - 水平安定板
- に使用

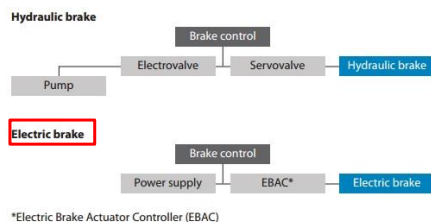
Primary Flight Control System

- 1 Aileron Servoactuator
- 2 Flaperon Actuator and Control Module
- 3 Inboard Spoiler Servoactuator
- 4 Outboard Spoiler Servoactuator
- 5 Electromechanical Spoiler Actuator and Motor Control Unit
- 6 Horizontal Stabilizer Trim Actuator and Motor Control Unit
- 7 Elevator Servoactuator
- 8 Rudder Servoactuator

<https://www.moog.com/products/actuation-systems/aircraft/primary-flight-control-actuation-system-for-787.html>

2-7. EMAの適用事例

3. B787の電気式ブレーキ



*Electric Brake Actuator Controller (EBAC)

ブレーキシステム構成図



<http://www.safranmbd.com/>

B787の電気式ブレーキ

ブレーキ部分では摩擦熱が発生する
→熱によって油圧アクチュエータ内の油に引火、火災が発生する危険性

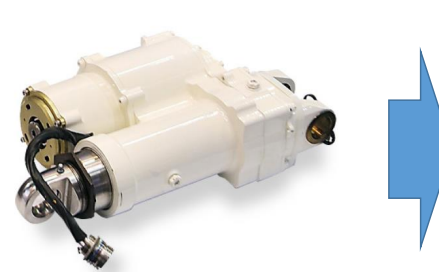
降着装置から油を除去することは、重要な技術的課題

導入メリット

- 火災発生リスクの回避
- 構成が簡単になる
- ブレーキ内のカーボンディスクの磨耗を監視可能 (センサを使用)

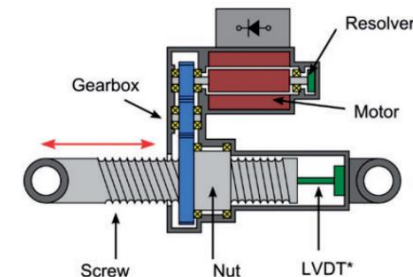
2-7. EMAの適用事例

2. B787のフライトコントロールシステム部分



<https://www.moog.co.jp/products/servoactuators/electric-actuators/customized-model.html>

ミッドボードスポイラー用アクチュエータ



Qiao, Guan, et al., Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 232.22 (2018): 4128-4151.

予想される内部構造

- 冗長性を考えてモータドライブシステムを2通り保有している
- 重量及び動作の最適化を考慮して先進的な材料を使用

MOOG社ホームページより

<https://www.moog.com/products/actuation-systems/aircraft/primary-flight-control-actuation-system-for-787.html>

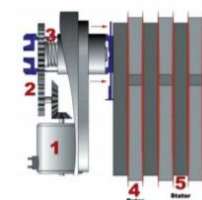
2-7. EMAの適用事例

4. B787の電気式ブレーキの仕組みと導入



<https://response.jp/article/img/2015/01/05/240902/812992.html>

タイヤ側



1. 電動モータ
2. 減速機構
3. ボールスクリュー
4. ローター・カーボンディスク
5. ステーター・カーボンディスク

<http://www.iadf.or.jp/document/pdf/28-5.pdf>

導入の結果・・・

- システム重量は油圧ブレーキシステムよりも重くなった
- 機器レベルでの信頼性はまだ低いシステムレベルでほぼ従来通りを確保
- 部分的な電動ブレーキ故障に対する定時出発率は格段に向上

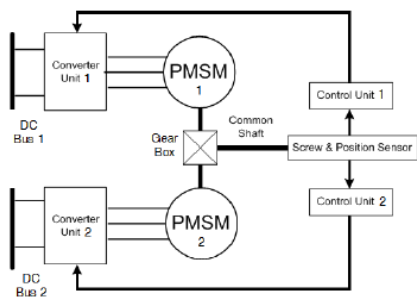
2-8. EMAの技術的課題

ジャミング:

電動モータで駆動される機構部品が、摩耗によるコンタミネーション（摩耗片）あるいは疲労による部品破損等によって固着し回転できなくなる

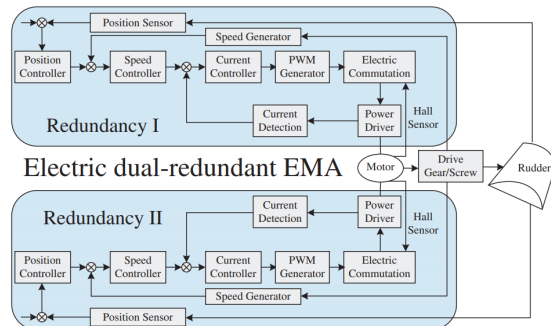
まだ完全なる信頼性は確保されておらず、世界中で研究が行われている

【冗長性確保の研究例】



P. Giangrande, et al., "Design of PMSM for EMA employed in secondary flight control systems," ESARS-ITEC 2018, IEEE, 2018.

モータドライブシステムを2つ実装

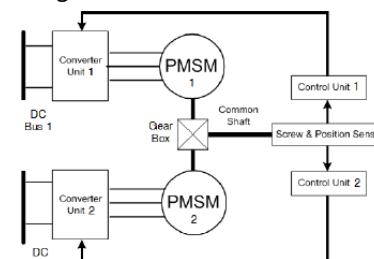


Qiao, Guan, et al., Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 232.22 (2018): 4128-4151.

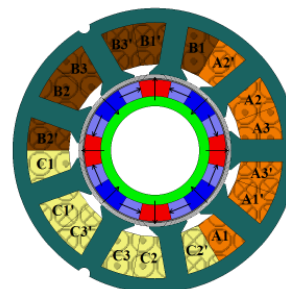
制御部分を2つ実装

2-9. フライトコントロールにおけるEMAの研究例

【Nittingham大 (英)】



システム概要



永久磁石型同期モータ概要

モータ基本仕様

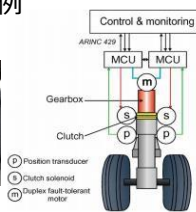
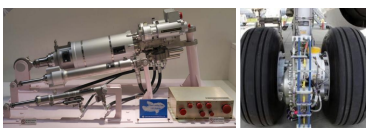
Parameter	Value
Rated Speed [rpm]	8000
Rated Torque [Nm]	5
Rated Current [A]	37.5
Phase Resistance [Ω]	0.175
d-axis Inductance [mH]	0.276
q-axis Inductance [mH]	0.274
PM Flux [Wb]	0.0225
Moment of Inertia [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	10^{-4}
Wire Thermal Class [$^{\circ}\text{C}$]	180

- 二次操縦翼面でのシステム冗長性確保のため、二つのモータドライブシステムを装備
- 永久磁石型同期モータは温度変化における減磁に強い、サマリウムコバルト磁石を使用し、ハルバツハ配列を採用（出力密度向上のため）
- 二つのドライブシステムで片方が短絡事故を起こした場合でも正常に稼働

P. Giangrande, et al., "Design of PMSM for EMA employed in secondary flight control systems," ESARS-ITEC 2018, IEEE, 2018.

3-1. 降着装置装置およびステアリング装置

降着装置・ステアリングの一例

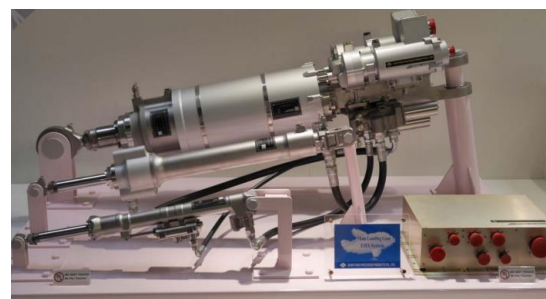


<http://skyfantasy.exblog.jp/14092510>

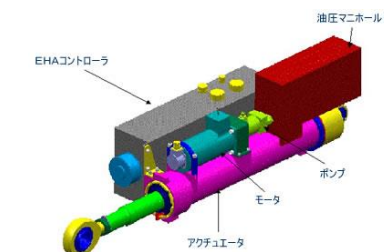
通常機では、降着装置やステアリングは集中油圧システムで作動

- EMA/EHAならば集中システムから切り離し、システムを分散配置可能
- 前輪にはいくつかのEMA/EHAが導入もしくは、技術検討が進んでいる

3-2. EHAを用いた降着装置装置の研究例



<http://www.iadf.or.jp/document/pdf/28-5.pdf>



<https://www.spp.co.jp/category/aerospace/research/eha.html>

降着装置を電動化することで・・・

- 集中油圧システムを排除することが可能
- 機体配管を含めて機体全体の軽量化に貢献できる可能性

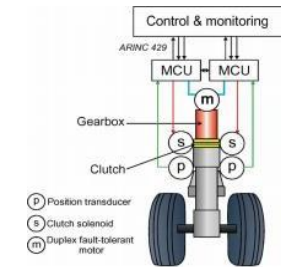
住友精密工業とエアバスによりEHAを用いた次世代航空機用降着装置の研究開発が進行中

3-3. EMAを用いたステアリング装置の研究

ステアリング装置



SAFRAN社(仏)とHoneywell社(米)による試験機



Bennett, J. W., et al., *Electric Power Applications, IET* 5.1, 2011

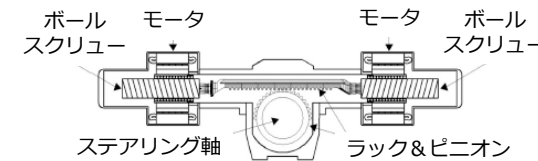
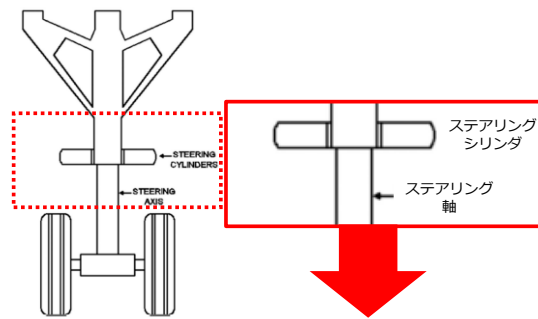
Newcastle大(英)による前輪ステアリング装置

- 航空機の地上移動の際の燃料消費を抑えたい
→電気モータによる「自走式車輪」の実用化を検討
- SAFRAN社(仏)とHoneywell社(米)による「egts™プロジェクト」が進行中
→まずは機内1通路の小型旅客機への導入が目標
- 欧米各国で様々なプロジェクトが進行中
- Newcastle大(英)のグループが「ELGEARプロジェクト」として「前輪の舵取りの電動化」を研究
- 冗長性の確保のため指示系統を2つ用意
→片方が故障の際にはClutch(図中のS)で切り離しが出来るように設計

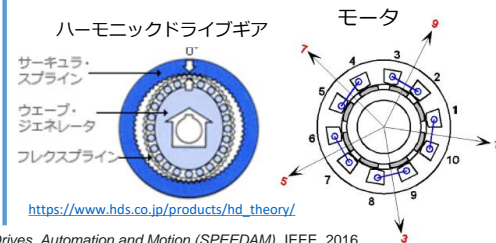
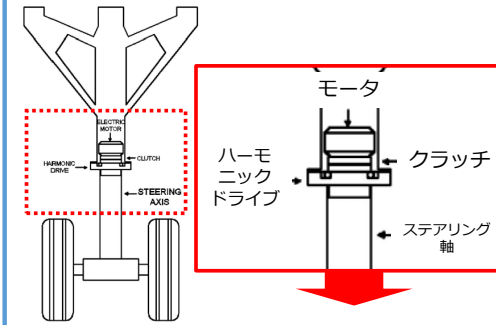
3-4. ステアリング装置用EMAの研究例

1. ハーモニックドライブ構造の概要

【従来のEMAランディングギア】



【ナポリ大学提案】



G. Brando, et al., 2016 *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. IEEE, 2016.

3-4. ステアリング装置用EMAの研究例

2. 永久磁石型同期モータ構造の概要

5相永久磁石型同期モータの仕様

Specification	Rated values
C_n	18 Nm
P_n	1500 W
V_n	190 V
n_m	800 rpm
η_{tar}	80%
thermal insulation class	H 180 °C
magnetic sheets	M270-35A
type of cooling	natural

5相永久磁石同期モータの概念図

- 従来のEMAは、二つのモータ+ボールスクリューにより構成
→ボールスクリュー部分とラック&ピニオンの直列接続
- より信頼性を高めるため、ハーモニックドライブギアと5相巻線(高トルク+高冗長性)による構成を採用
- 最適設計によるモータ重量低減、巻線最大温度の増加を達成

G. Brando, et al., 2016 *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. IEEE, 2016.

4. まとめ

- 電動航空機におけるアクチュエータ技術に関して導入事例や、進められている研究の一例を紹介した。
- 近年は油圧式アクチュエータを電気・油圧式(EHA/EBHA)や電気機械式(EMA)に置き換えた航空機(A380, B787, etc....)が登場してきている
- ただしEMAはジャミングなどの技術的な問題があり、これらの完全なる解決がなされていないため、現在もまだ信頼性確保のために様々な検討が行われている
- これらの解決がなされることで、将来的にはステアリング装置をはじめとした様々な部位への導入が可能となる。